

SCORPIUS X-1 È UNA BILANCIA DI TORSIONE MOLTO SPECIALE?

SOMMARIO

Abbiamo pubblicato i risultati della ricerca di [onde gravitazionali continue](#) (CW) provenienti da [Scorpius X-1](#), un [sistema binario di bassa massa che è un emettitore di raggi X](#). Si tratta della ricerca più accurata effettuata finora, e se Scorpius X-1 emettesse onde gravitazionali (GW) con un'intensità pari a quella prevista dal modello "bilancia di torsione di spin", i rivelatori del [Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory](#) (LIGO) sarebbero stati in grado di captare per la prima volta questo segnale nell'intervallo di frequenze tra 50 e 200 Hz.

Utilizzando i dati della prima parte del [quarto periodo osservativo](#) (O4a) della [Collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK), abbiamo analizzato la banda di frequenza 25–200 Hz utilizzando un metodo di [correlazione incrociata](#). Analizzando i dati dal punto di vista della [stella di neutroni](#) nel sistema binario siamo stati in grado di tenere conto del moto orbitale del sistema, consentendo alla nostra analisi di essere [coerente](#) su un periodo di tempo più lungo. Abbiamo identificato alcuni segnali potenzialmente interessanti con un [rapporto segnale-rumore](#) (SNR) che è superiore alla nostra soglia di rivelazione. Questi segnali sono stati poi rializzati con un tempo di coerenza ancora più lungo per verificare se il loro comportamento fosse compatibile con quello di un segnale reale. Tuttavia, nessuno dei candidati ci ha consentito di confermare un'osservazione di onde gravitazionali.



Figura 1: Raffigurazione artistica di un sistema binario poco massiccio emettitore di raggi X come Scorpius X-1. Crediti: Gabriel Pérez Díaz, SMM (IAC)

COSA STIAMO CERCANDO?

Cercare le onde gravitazionali emesse da una stella di neutroni assomiglia al tentativo di sentire qualcuno che parla ad una grande distanza da noi. Questo è possibile solo se abbiamo a disposizione uno strumento altamente sensibile, capace di rivelare le piccole oscillazioni nell'aria prodotte da chi parla. Nel nostro caso cerchiamo di rivelare onde gravitazionali continue che hanno [ampiezze](#) significativamente inferiori rispetto ai tanti segnali gravitazionali già osservati, provenienti dalla fusione di sistemi binari di oggetti compatti come [buchi neri](#) o stelle di neutroni. Tuttavia, diversamente dai segnali di fusione di sistemi binari compatti che vengono emessi in tempi molto brevi (in genere inferiori ad un secondo), le onde continue hanno una durata di gran lunga maggiore. Pertanto, le ricerche di onde continue possono combinare i dati presi durante lunghi periodi di tempo, come un intero periodo osservativo (con una durata dell'ordine di un anno), per accumulare informazione nel tempo e aumentare la probabilità di osservare uno di questi segnali. Mentre la fusione di un sistema binario compatto produce un ["chirp"](#), vale a dire un segnale che aumenta rapidamente sia in frequenza che in ampiezza, le onde continue sono segnali "quasi-monocromatici" – cioè mantengono una frequenza quasi costante su lunghe scale temporali.

Le stelle di neutroni sono le fonti più probabili di onde continue; questi oggetti sono estremamente densi e ruotano a velocità incredibili, fino a centinaia di rotazioni ogni secondo. Questa veloce rotazione fa sì che anche la più piccola asimmetria nella distribuzione di massa di una stella di neutroni generi onde gravitazionali che hanno una frequenza doppia della frequenza di rotazione della stella. Inoltre i nostri rivelatori si muovono insieme alla Terra che ruota e si muove nella sua orbita, e ciò – insieme a qualsiasi moto variabile nel tempo della stella di neutroni stessa – produce uno [spostamento Doppler](#); per tal motivo dobbiamo cercare una frequenza leggermente diversa da quella effettivamente emessa.

Tra le sorgenti note, la più promettente è il sistema binario di bassa massa (LMXB, dall'inglese *low mass X-ray binary*) Scorpius X-1 (Sco X-1). Un LMXB (vedi [Figura 1](#)) è un sistema binario costituito da un oggetto compatto e da una stella di massa inferiore. Sco X-1 è un LMXB che si trova nella nostra galassia, ad esclusione del Sole è la sorgente di [raggi X](#) persistenti più luminosa nel cielo, ed è relativamente vicina, a soli 9000 [anni luce](#) di distanza. In un LMXB, la stella di neutroni estrae materia gassosa dalla compagna in un processo noto come [accrescimento](#). Il materiale accumulato crea una [protuberanza](#) sulla superficie della stella di neutroni, causando un'asimmetria nella sua distribuzione di massa che genera onde continue nel corso della sua rotazione.

Abbiamo dunque due fenomeni in competizione tra di loro: da un lato l'accumulo di materia sulla stella di neutroni produce un'accelerazione della velocità di rotazione, mentre l'emissione di onde gravitazionali, insieme ad altre forze come l'interazione del campo magnetico della stella di neutroni con l'ambiente, possono produrre una decelerazione. Quando questi effetti si annullano a vicenda, la frequenza di rotazione della stella di neutroni rimane costante. Lo scenario in cui ciò accade è noto come [bilanciamento del momento torcente](#) e fornisce una stima ottimistica (perché trascura altri contributi alla decelerazione) della potenza attesa del segnale gravitazionale. La massa trasferita a Sco X-1 dalla stella compagna non è costante. Poiché la rotazione di Sco X-1 è dovuta al momento torcente di accrescimento, le variazioni dell'accumulo di massa producono nel tempo fluttuazioni casuali della frequenza di rotazione della stella di neutroni. Un grafico della frequenza di rotazione assomiglia quindi ad un cammino casuale (indicato spesso con il termine inglese *spin wandering*). Questo fenomeno di spin wandering fa sì che, nel corso di una lunga osservazione, il segnale gravitazionale non mantenga la fase prevista, il che complica l'analisi e riduce il SNR (e dunque, la possibilità di rivelare di questo fenomeno).

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i www.ligo.org
nostri www.virgo-gw.eu
siti web: gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



L'accumulo di materia sulla stella di neutroni produce inoltre raggi X che possono essere osservati con [telescopi a raggi X](#) per stimare la velocità di accrescimento. Le osservazioni di Sco X-1 su un'ampia gamma di [frequenze elettromagnetiche](#), dalle frequenze radio ai raggi X, hanno fornito informazioni sulla sua posizione nel cielo e sui parametri dell'orbita della stella di neutroni. Queste informazioni sono essenziali per determinare i possibili segnali gravitazionali, rendendo la nostra ricerca un esempio di [astronomia multi-messaggio](#).

Ad oggi, molte ricerche su Sco X-1 sono già state condotte utilizzando tecniche note come [tecnica radiometrica](#) e [metodo Viterbi](#), oltre al metodo di correlazione incrociata impiegato in questo lavoro.

COME ABBIAMO ANALIZZATO I SEGNALI?

I segnali gravitazionali sono modulati dall'effetto Doppler dovuto alla rotazione giornaliera della Terra e al moto orbitale annuale della Terra attorno al Sole, così come dal moto di Sco X-1 attorno al [centro di massa](#) del suo sistema binario (si veda la **Figura 2**). Questo effetto è simile a quello della sirena di un camion dei pompieri, che si sente più acuto quando si avvicina e più basso quando si allontana. Per rimuovere l'effetto Doppler è necessario trasformare i dati dal sistema di riferimento del rivelatore a quello in cui la sorgente è a riposo: nell'esempio del camion dei pompieri questo equivale a salire sul camion, in modo da sentire la sirena sempre alla stessa frequenza; per fare ciò usiamo una tecnica chiamata *ricampionamento*. Questa correzione rimuove l'effetto Doppler causato sia dal moto terrestre che dal moto orbitale del sistema binario, e il segnale assume una frequenza fissa.

Infine, dopo avere trasformato i dati dal sistema di riferimento del rivelatore al sistema in cui la stella di neutroni è a riposo si utilizza la tecnica di correlazione incrociata.

Per comprendere meglio questa tecnica, si pensi ad un clarinettista che cammina mentre suona una certa nota musicale, avvicinandosi e allontanandosi da noi. I movimenti del clarinettista faranno sì che la nota suoni leggermente più acuta o più bassa. Supponiamo ora che due ascoltatori in luoghi diversi registrino il suono del clarinetto. Grazie all'osservazione visiva possono stimare la velocità del musicista e la durata del movimento avanti e indietro. Confrontando il suono ricevuto da ciascun ascoltatore si può anche monitorare l'intonazione della nota musicale nel tempo e correggere lo spostamento Doppler dovuto al movimento del clarinettista. Tanto migliore è la corrispondenza tra le frequenze udite dai due ascoltatori, tanto più accuratamente si può recuperare la vera frequenza della nota suonata.

Analogamente, il metodo di correlazione incrociata cerca correlazioni tra segmenti di dati rilevati in momenti diversi e/o da rivelatori differenti: ciò viene fatto utilizzando un modello per la forma di un'onda gravitazionale prodotta da una stella di neutroni in rotazione, e confrontando (correlare) questo modello con i dati. Per costruire questo modello è necessaria la conoscenza delle proprietà del sistema binario, come la frequenza del segnale gravitazionale, la del segnale gravitazionale, la posizione nel cielo e i parametri orbitali. Nel caso di Sco X-1 la frequenza del segnale di onda gravitazionale è sconosciuta, mentre la posizione nel cielo è nota con precisione grazie alle osservazioni elettromagnetiche. I parametri orbitali sono noti anch'essi, sebbene in modo piuttosto impreciso, quindi dobbiamo effettuare l'analisi utilizzando molti possibili insiemi di parametri che comprendono la frequenza del segnale, il periodo, la fase e la dimensione dell'orbita. La nostra ricerca considera correlazioni solo tra dati separati da un intervallo di tempo inferiore al cosiddetto *tempo di coerenza*, che possiamo regolare all'interno dell'analisi

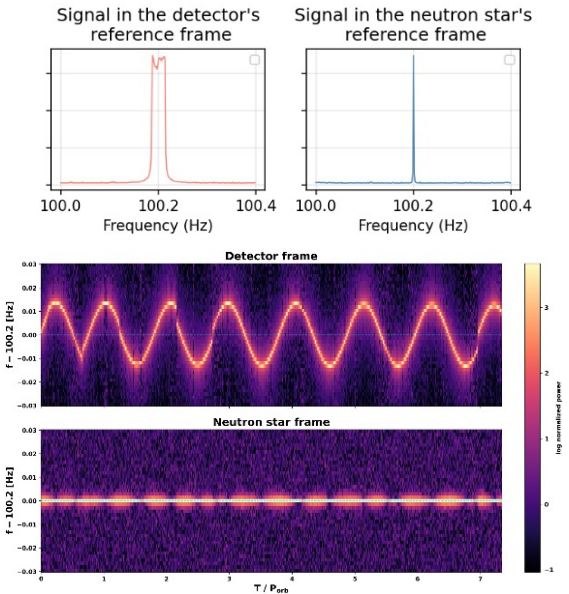
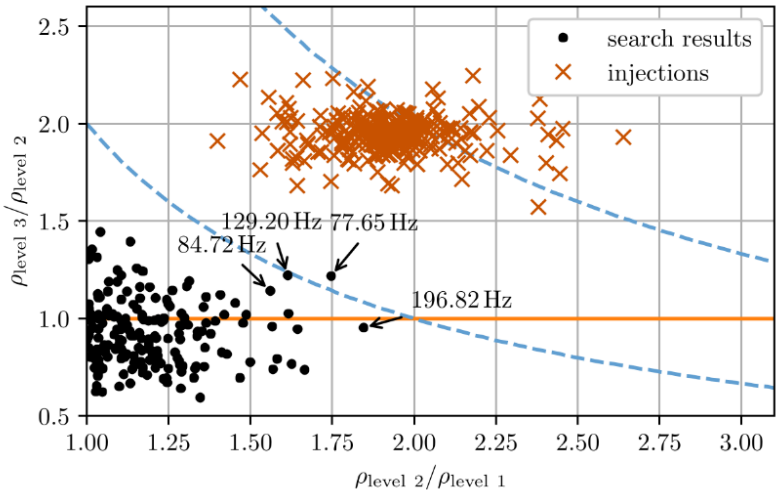


Figura 2: I pannelli superiori mostrano come la potenza del segnale GW osservato sia distribuita su diverse frequenze nel sistema di riferimento del rivelatore (a sinistra) e nel sistema di riferimento della stella di neutroni (a destra). Nel pannello destro, quando teniamo conto della modulazione Doppler dovuta al moto orbitale, il segnale assume una frequenza fissa. (A scopo illustrativo, l'ampiezza è artificialmente molto grande) I pannelli centrale e inferiore mostrano gli [spettrogrammi](#) corrispondenti, cioè grafici della frequenza del segnale nel tempo: la frequenza del segnale nel sistema di riferimento del rivelatore oscilla sinusoidalmente a causa del moto orbitale del sistema binario, mentre nel sistema di riferimento della stella di neutroni ha la frequenza costante $f = 100.2$ Hz. La modulazione Doppler aggiuntiva dovuta al moto orbitale terrestre attorno al Sole non è visibile perché è molto più piccola rispetto alla modulazione orbitale di Sco X-1.

Figura 3 (Fig. 4 nel nostro articolo): I risultati delle analisi di controllo dei risultati del nostro studio. L'asse orizzontale mostra il rapporto segnale-rumore (SNR) prima e dopo avere quadruplicato il tempo di coerenza nella correlazione incrociata, che teoricamente dovrebbe raddoppiare il rapporto segnale rumore (SNR). L'asse verticale mostra il rapporto tra SNR prima e dopo avere quadruplicato il tempo di coerenza una seconda volta, il che dovrebbe quindi teoricamente aumentare il SNR originale di un fattore quattro. Le linee blu tratteggiate mostrano valori costanti del rapporto tra i SNR prima e dopo le due quadruplicazioni combinate, con la linea tratteggiata inferiore pari a 2 e la linea tratteggiata superiore pari a 4. Le croci rosse mostrano segnali iniettati simulati, i cui SNR aumentano ad ogni aumento del tempo di coerenza, come previsto. In confronto, i SNR dei candidati alla ricerca (punti neri) non seguono il comportamento atteso da un vero segnale. Tuttavia, un possibile segnale reale è indicato a una frequenza di 129.20 Hz; questo segnale mostra un SNR crescente con quadruplicamento, anche se non così forte come ci si aspetterebbe per un segnale ideale. Le frequenze di altri tre possibili segnali reali sono anch'esse indicate nella figura.



La nostra analisi copre la prima parte del quarto periodo osservativo di LVK (O4a), che si è svolta da maggio 2023 a gennaio 2024. Escludendo i momenti in cui uno o entrambi i rivelatori non prendevano dati di qualità sia abbastanza alta da poterli utilizzare nell'analisi, complessivamente abbiamo circa 159 giorni di dati dal rivelatore LIGO Hanford e 163 giorni dal rivelatore LIGO Livingston. Il tempo di coerenza è stato impostato a 24 ore.

COSA ABBIAMO IMPARATO?

Il risultato della nostra ricerca è un SNR calcolato per ogni combinazione di valori dei parametri considerati. Se il SNR per una qualsiasi combinazione di questo tipo è superiore a quanto ci si aspetterebbe da dati che contengono solo rumore, consideriamo questa combinazione di parametri come candidata alla descrizione di un possibile segnale reale presente nei dati. Per ognuno di questi candidati facciamo un'analisi più approfondita rianalizzando i relativi dati con un tempo di coerenza più lungo e con una griglia di punti più ristretta nello spazio dei parametri attorno alla combinazione di valori possibili. Se il SNR aumenta, ripetiamo il processo, adottando un tempo di coerenza ancora più lungo. Inoltre, eseguiamo questa analisi inserendo ("iniettando") nel rumore di fondo dei nostri rivelatori dei segnali di onde gravitazionali simulati simili ai candidati trovati in precedenza. La **Figura 3** mostra che nessuno dei candidati identificati nella nostra ricerca ha aumentato il proprio SNR nello stesso modo delle iniezioni simulate, che è quello che ci aspetteremmo da un vero segnale.

Poiché la nostra ricerca non ha portato a nessuna osservazione confermata, questo ci permette di stabilire quali sono i limiti di intensità in funzione della frequenza sotto i quali Sco X-1 emette onde gravitazionali (si veda la **Figura 4**). Questi limiti superiori sono scelti in modo che se un segnale fosse presente con quell'ampiezza o superiore, la nostra ricerca avrebbe prodotto un SNR altrettanto alto, o superiore, di quello osservato a quella frequenza, con una probabilità del 95%. Questi risultati rappresentano ad oggi i vincoli più sensibili sull'emissione di onde gravitazionali da Sco X-1, e permettono di mettere stabilire quali sono le ampiezze di segnale realistiche predette dal modello di bilanciamento del momento torcente. La **Figura 5** mostra i corrispondenti limiti superiori all'ellitticità della stella di neutroni (una misura che indica approssimativamente quanto la stella si allontani da una forma sferica) e l'ampiezza del suo **modo r** (che misura quanto sia grande la frequenza di oscillazione della stella rispetto alla sua velocità di rotazione) in funzione della frequenza.

Con la maggiore sensibilità prevista per i prossimi periodi osservativi di LIGO-Virgo-KAGRA, ci aspettiamo di poter effettuare ricerche di segnali ancora più deboli da Sco X-1. In una situazione più realistica in cui si considerano altri meccanismi di decelerazione della velocità di rotazione oltre alle onde gravitazionali, si prevede che l'intensità delle onde gravitazionali sia inferiore dell'ampiezza nominale del bilanciamento del momento torcente. Pertanto, una maggiore sensibilità nei futuri periodi osservativi significa che potremo sondare scenari più realistici e forse osservare onde gravitazionali da Sco X-1.

Le osservazioni elettromagnetiche offrono un'altra opportunità per capire meglio questo sistema fisico. Se avremo la possibilità di fare osservazioni elettromagnetiche di fenomeni di pulsazione o di esplosioni termonucleari su Sco X-1, potremo forse vincolare meglio la frequenza dei segnali gravitazionali emessi. Inoltre, osservando la variabilità nei raggi X, potremo modellare e prevedere meglio le variazioni del processo di accumulo di massa di Sco X-1, forse comprendere e tracciare lo spin wandering della stella di neutroni.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)

È liberamente disponibile su Arxiv il preprint dell'articolo che descrive i dettagli dell'analisi e i risultati – "Sub-Torque-Balance Upper Limits on Continuous Gravitational Waves from Scorpius X-1": <https://arxiv.org/abs/2607.07765>

Sono anche disponibili gratuitamente i preprint che descrivono il metodo in dettaglio:

"The cross-correlation search for periodic gravitational waves": <https://arxiv.org/abs/0712.1578>

"Model-Based Cross-Correlation Search for Gravitational Waves from Scorpius X-1": <https://arxiv.org/abs/1504.05890>

"Resampling to accelerate cross-correlation searches for continuous gravitational waves from binary systems": <https://arxiv.org/abs/1712.06515>

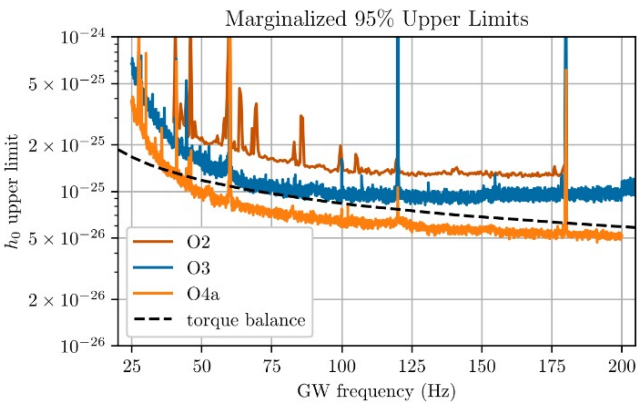


Figura 4 (adattata dalla Fig. 5 del nostro articolo): variazione in funzione della frequenza del limite superiore del 95% sull'ampiezza delle onde gravitazionali (h_0), ottenuto dalla ricerca di correlazione incrociata utilizzando i dati di O4a. Sono mostrati anche i risultati delle ricerche di correlazione incrociata nei precedenti periodi osservativi O2 e O3. Per la prima volta, i limiti superiori di O4a hanno superato il limite di bilanciamento del momento torcente previsto sull'ampia gamma di frequenze 50–200 Hz, marginalizzato (cioè mediato) sull'angolo di inclinazione (sconosciuto) dell'asse di rotazione della stella di neutroni.

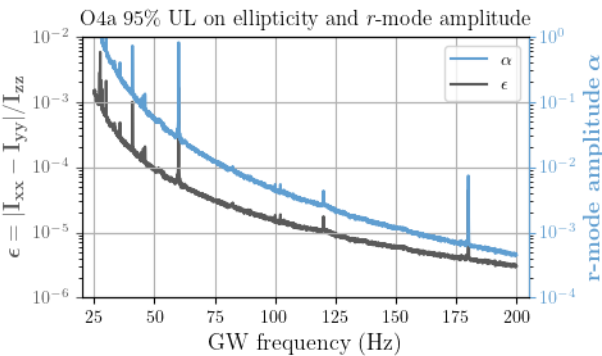


Figura 5 (Fig. 7 del nostro articolo): variazione in funzione della frequenza del limite superiore del 95% sull'ellitticità e sull'ampiezza e sul modo r della stella di neutroni in Sco X-1, determinato dal limite superiore sull'ampiezza delle onde gravitazionali mostrato nella Figura 4. Alle frequenze più elevate la nostra ricerca diventa sensibile alla massima ellitticità sostenibile dalla crosta della stella di neutroni. Per quel che riguarda il modo r, i limiti superiori sono ben al di sopra dell'ampiezza di saturazione prevista per il modo r.

GLOSSARIO

Oggetto compatto: Un oggetto astrofisico estremamente denso come un buco nero, una stella di neutroni o una nana bianca.

Ellitticità: misura la distribuzione di massa non assialmente simmetrica attorno all'asse di rotazione di una stella di neutroni. Un pallone da calcio perfettamente sferico non ha ellitticità, ma un pallone da rugby o un pallone da football americano allungato lungo un asse ha ellitticità diversa da zero.

Hertz: Un'unità di frequenza uguale a un periodo al secondo.

Angolo di inclinazione: Angolo tra l'asse di rotazione di una stella e una direzione di riferimento come la linea di vista verso l'osservatore.

Sistema binario a raggi X di bassa massa (LMXB): Un sistema binario costituito da un oggetto compatto come una nana bianca, una stella di neutroni o un buco nero, e una stella compagna di massa inferiore, in cui l'oggetto compatto cattura materia dalla compagna, generando raggi X.

Rapporto segnale-rumore (SNR): Il rapporto tra la potenza del segnale e la potenza del rumore. Misura la potenza del segnale rispetto alle fonti di rumore che lo contaminano.

Deformazione gravitazionale: La variazione frazionaria della distanza tra due punti di riferimento dovuta alla deformazione dello spazio-tempo causata da un'onda gravitazionale di passaggio.

Limite superiore: Il valore massimo possibile che una quantità può avere senza essere osservata. In questo articolo, la quantità di interesse è la massima ampiezza intrinseca di un'onda gravitazionale continua che arriva sulla Terra. Poiché non abbiamo osservato alcun segnale, abbiamo fissato un limite al livello di confidenza del 95%, il che significa che un segnale reale con quell'ampiezza di deformazione (o superiore) avrebbe prodotto un SNR superiore a quello misurato nel 95% (o più) dei casi.