

SN 2023ixf È ABBASTANZA VICINA DA POTERNE RIVELARE LA RADIAZIONE GRAVITAZIONALE?

INTRODUZIONE

I collassi stellari sono fenomeni astrofisici estremamente energetici. Si verificano quando una stella massiccia la cui massa è circa 8 volte più grande della massa del Sole sta per raggiungere la fine del suo ciclo di vita. L'idrogeno si è già fuso in elio, poi l'elio si è fuso in carbonio, ecc. Una delle componenti di cui è costituito il plasma caldo della stella è il gas di elettroni ed esso esercita una pressione particolare, la pressione di degenerazione dovuta al principio di esclusione di Pauli. Questa pressione, insieme alla pressione dovuta al calore prodotto dalle reazioni di fusione nucleare residue si oppone alla gravità. La temperatura e la densità della stella aumentano man mano che il nucleo si contrae fino a quando, con il procedere delle reazioni nucleari, è composto principalmente da ferro. Non appena la massa del nucleo supera il **limite di Chandrasekhar** di $1,4 M_{\odot}$ (il simbolo M_{\odot} indica la massa del Sole), la **pressione di degenerazione degli elettroni** non è più abbastanza forte da contrastare la gravità e il nucleo collassa in una frazione di secondo. Vengono prodotti neutroni e neutrini. Quando la densità del nucleo della stella raggiunge la densità di un nucleo atomico, il collasso si arresta e la materia in caduta rimbalza, generando un'onda d'urto che ad un certo punto si interrompe. Però, grazie al riscaldamento dovuto ai neutrini, alla **convezione di materia** e/o all'**instabilità da shock da accrescimento stazionario (SASI)**, l'onda d'urto riparte espellendo gli strati esterni della stella e generando la supernova osservata nei telescopi ottici. Questo particolare tipo di supernova è chiamato supernova a collasso del nucleo (CCSN).

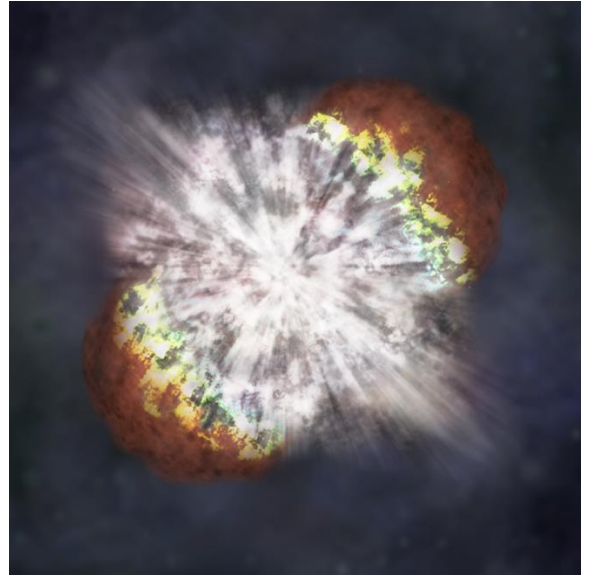


Figura 1: Illustrazione artistica di una supernova, uno dei fenomeni più energetici dell'Universo, che è il destino delle stelle massicce. Crediti immagine: NASA/CXC/M.Weiss

Da molto tempo i collassi stellari vengono considerati una possibile sorgente di radiazione gravitazionale. Però i processi fisici all'origine del collasso sono piuttosto complessi, l'emissione di onde gravitazionali (GW) è difficile da prevedere, e un rilevamento fornirebbe una grande quantità di informazioni sulla dinamica del collasso. Tuttavia, ci si aspetta che il segnale gravitazionale sia debole, ordini di grandezza più debole del segnale emesso dalla fusione di due stelle di neutroni o due buchi neri. Solo le CCSN vicine, quelle che si verificano nella nostra Galassia o in una galassia del **Gruppo Locale**, dovrebbero emettere abbastanza radiazione gravitazionale da poter essere rilevate dall'attuale rete di rivelatori terrestri composta dai rivelatori LIGO negli Stati Uniti, dal rivelatore Virgo in Italia e da KAGRA in Giappone. Purtroppo la frequenza di queste supernove è molto bassa. In media, ci si aspetta solo poche CCSN per galassia e per secolo. La supernova SN 1987A, osservata nella Grande Nube di Magellano (50 kpc o 163 000 anni luce) rimane così la CCSN più recente nell'universo a noi vicino. Per ampliare il numero di potenziali sorgenti, la collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) sta cercando anche onde gravitazionali emesse da CCSN più distanti, entro circa 30 milioni di anni luce, o circa 10 volte più lontano della vicina galassia di Andromeda.

FIGURE NELLA PUBBLICAZIONE

Per maggiori informazioni su queste figure e su come sono state prodotte, leggete il [preprint](#) disponibile gratuitamente.

PER SAPERNE DI PIÙ

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

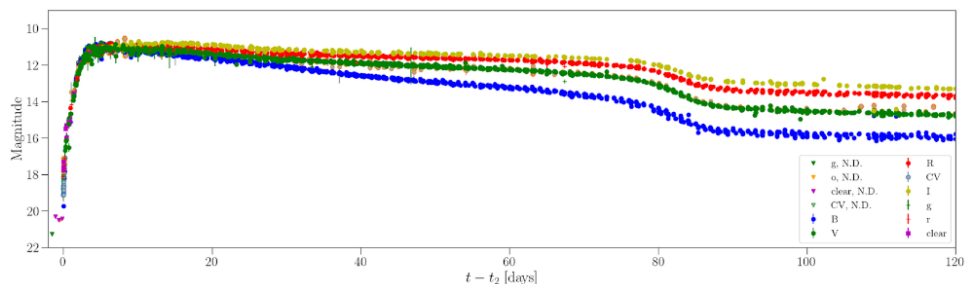


Figure 2: **Curva di luce** della supernova SN 2023ixf. Ciascuna curva mostra la luminosità (espressa come magnitudine stellare) della supernova SN 2023ixf in tre diverse bande fotometriche in un intervallo di 120 giorni a partire dalla data della prima osservazione.

PERCHÉ SN 2023ixf È INTERESSANTE PER L'ASTRONOMIA CON LE ONDE GRAVITAZIONALI?

SN 2023ixf è una supernova di tipo II scoperta dall'astronomo dilettante Koichi Itagaki il 19 maggio 2023 nella galassia ospite Messier 101, nota anche come Galassia Girandola. Ciò che rende interessante SN 2023ixf è la relativa vicinanza di questo evento. Situato a 6,7 Mpc (21,8 milioni di anni luce) di distanza, questa è una delle CCSN più vicine scoperte mentre i rivelatori LVK stavano raccogliendo dati. Ciò ha offerto una grande opportunità per la ricerca di onde gravitazionali emesse dall'esplosione. La supernova SN 2023ixf può essere paragonata a SN 2017eaw che è stata scoperta nel 2017 in una galassia quasi alla stessa distanza. Ma, a quel tempo, i due rivelatori LIGO erano 2-3 volte meno sensibili rispetto al 2023.

Al momento della scoperta di SN 2023ixf, il 24 maggio 2023, i due rivelatori LIGO erano operativi ma ancora in una fase di messa a punto prima che iniziasse ufficialmente il quarto periodo osservativo della collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA. Di conseguenza, i due rivelatori LIGO non erano costantemente attivi nei giorni in cui è avvenuto il collasso di SN 2023ixf.

Ma come facciamo a sapere quando è avvenuto il collasso? SN 2023ixf è stata seguita da molti telescopi ottici, a raggi X e radiotelescopi. Come una tipica CCSN, la curva di luce mostra un aumento fino a un massimo a circa cinque giorni dopo la scoperta della supernova, seguito da un plateau che dura circa un mese (si veda **Figura 2**). Grazie alla ricchezza di osservazioni, il momento dell'emersione dell'onda d'urto (lo **shock breakout**), quando la luce dell'esplosione appare per la prima volta, è abbastanza ben stimato. Tuttavia, questo non dice quando è avvenuto il collasso poiché c'è un ritardo tra il collasso e lo shock breakout che dipende dalla natura della stella che è collassata. Un'ampia serie di osservazioni di M101 fatte da telescopi terrestri, dal telescopio spaziale Hubble e dal telescopio spaziale Spitzer prima della scoperta di SN 2023ixf, suggerisce che la stella progenitrice di SN 2023ixf fosse una supergigante rossa avvolta da polveri, con luminosità variabile ed una massa stimata compresa tra 8 e 20 masse solari. Questa grande incertezza sulla massa della stella progenitrice implica che il collasso potrebbe essere avvenuto fino a 5 giorni prima dello shock breakout. In questa finestra temporale, i due rivelatori LIGO Hanford (H1) e Livingston (L1) hanno preso dati contemporaneamente solo per il 15% del tempo totale.

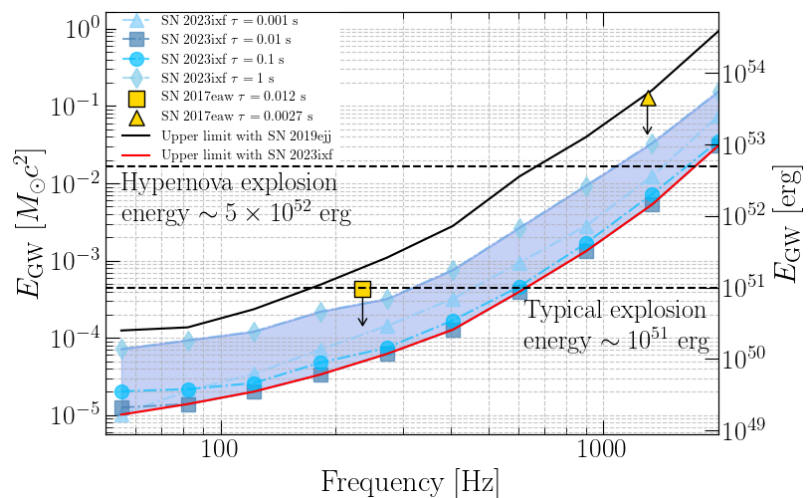


Figura 3: Energia emessa sotto forma di onde gravitazionali in unità di massa solare moltiplicata per la velocità della luce al quadrato (scala verticale a sinistra), oppure in **erg** (scala verticale a destra), in funzione della frequenza di un segnale nel caso dell'instabilità a barra. Questa energia corrisponde ad un'efficienza di rilevamento del 50% e ad un tasso di 2,1 falsi allarmi al giorno. La regione blu ombreggiata contiene i risultati per segnali di durata diversa, da pochi ms fino a 1 secondo. La durata di un segnale è data dal parametro τ che compare nella legenda. I quadrati e i triangoli gialli rappresentano i limiti superiori all'energia dell'emissione gravitazionale ottenuta con i dati di SN 2017eaw. La linea nera mostra il miglior limite superiore ottenuto con SN 2019ejj. Le linee tratteggiate orizzontali mostrano la tipica energia elettromagnetica emessa da una supernova standard e da un'ipernova.

COSA ABBIAMO SCOPERTO?

Le onde gravitazionali emesse dalle CCSN sono difficili da calcolare e possono essere previste solo da codici di simulazione idrodinamica che tengono conto anche della relatività generale. Le previsioni dipendono da parametri, purtroppo sconosciuti, che definiscono la stella progenitrice della CCSN. Questo, ed altri motivi legati alla fisica delle CCSN, rende impossibile applicare le tecniche dei **filtri ottimali** che tanto successo hanno avuto nella rilevazione di onde gravitazionali nei sistemi di oggetti binari compatti. Per la ricerca dei segnali ci affidiamo invece a *coherent Waveburst* (cWB-XP), un algoritmo che cerca la correlazione nei dati di almeno due rivelatori supponendo che il segnale sia di breve durata – dell'ordine di un secondo al massimo – con frequenze comprese tra circa 20Hz e 2kHz.

Non è stato trovato alcun evento candidato interessante nella finestra temporale di cinque giorni in cui potrebbe essere avvenuto il collasso. Più precisamente, l'evento candidato più significativo ha una probabilità del 76% di essere un falso allarme, facendoci pensare che l'evento sia probabilmente dovuto al rumore. L'assenza di un segnale gravitazionale potrebbe essere dovuta al fatto che il collasso sia avvenuto quando i due rivelatori LIGO non erano in modalità osservativa (15% di copertura del tempo totale). Un'altra possibile spiegazione è che il segnale gravitazionale emesso è troppo debole. Abbiamo stimato che anche i modelli più ottimistici che utilizzano la relatività numerica prevedono un segnale gravitazionale che non è rilevabile se emesso ad una distanza superiore a quella della Grande Nube di Magellano che si trova a circa 163 mila anni luce da noi, vale a dire ad una distanza 100 volte inferiore a quella di SN 2023ixf.

COSA ABBIAMO IMPARATO?

Non abbiamo osservato alcun segnale gravitazionale associato a SN 2023ixf, ma se assumiamo che il collasso sia avvenuto quando i due LIGO erano in modalità osservativa, possiamo stimare un limite superiore sull'energia emessa sotto forma di onde gravitazionali. Naturalmente, questo dipende dal meccanismo di esplosione della supernova. La stella progenitrice ruotava? La convezione della materia era abbastanza forte da eccitare i modi fondamentali della **proto-stella di neutroni** (PNS)? Il meccanismo SASI stava aumentando il riscaldamento dei neutrini? I campi magnetici hanno avuto un ruolo nell'aumentare il segnale? Poiché non conosciamo le risposte, consideriamo l'emissione gravitazionale di un semplice ellissoide triassiale in rotazione (e quindi con una forma simile a un pallone da rugby) per modellare lo sviluppo di un'**instabilità a barra** che è talvolta presente nelle simulazioni di collasso del nucleo. La SN 2023ixf permette di migliorare di quasi un ordine di grandezza il limite superiore sull'energia che avrebbe potuto essere emessa da un evento come questo. Nel caso di un'ipotetica emissione a bassa frequenza, siamo sensibili ad un'energia totale emessa dell'ordine di $10^{-5} M_{\odot}c^2$ come mostrato in **Figura 3**. Questa quantità corrisponde all'energia di una sorgente che verrebbe rilevata con un'efficienza del 50% e con una probabilità del 76% di essere un falso allarme. Ciò si deve confrontare con le previsioni delle simulazioni numeriche di CCSN: l'intervallo di energia emessa è piuttosto ampio e va da $10^{-10} M_{\odot}c^2$ per la meno energetica stella progenitore non rotante, fino a $10^{-6} M_{\odot}c^2$ per sorgenti in rotazione veloce, dove l'energia è espressa in termini di frazione della massa del Sole, considerando la famosa equazione di Einstein $E=mc^2$. In termini di energia emessa, ciò significa che con eventi di CCSN come la SN 2023ixf la nostra capacità osservativa deve aumentare di diversi ordini di grandezza prima di poter osservare ciò che prevede il meccanismo di esplosione meno energetico.

L'ampiezza del segnale gravitazionale nel caso di instabilità a barra può essere parametrizzata da un fattore di asimmetria, chiamato anche ellitticità. La **Figura 4** riporta l'ellitticità per una gamma di frequenze e durate del segnale GW. I limiti superiori più stringenti sull'ellitticità si ottengono per i segnali più lunghi, che vanno da 10^3 in corrispondenza della frequenza di ricerca più bassa fino ad 1,04 per la frequenza di 2 kHz. Ciò migliora i precedenti limiti superiori stabiliti con la supernova SN 2019ejj scoperta durante il terzo periodo osservativo.

PROSPETTIVE

Sfortunatamente, anche se SN 2023ixf è uno degli eventi CCSN più interessanti registrati negli ultimi anni per la ricerca dell'emissione gravitazionale da supernovae, al momento della prima osservazione la rete di rilevatori gravitazionali non era tutta operativa e con i dati gravitazionali copriamo solo il 15% della possibile finestra osservativa. Ciò limita la possibilità di rivelazione.

Supponendo che il collasso sia avvenuto quando i due rivelatori LIGO erano in modalità osservativa, SN 2023ixf ci permette di limitare lo spazio dei parametri per i modelli di emissione GW. Tuttavia, le migliori prospettive di rilevazione di onde gravitazionali da supernovae con l'attuale generazione di rivelatori li possiamo avere solo con una CCSN nel **Gruppo Locale** di galassie.

PER SAPERNE DI PIÙ

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo [qui](#) oppure su [arXiv.org](https://arxiv.org).

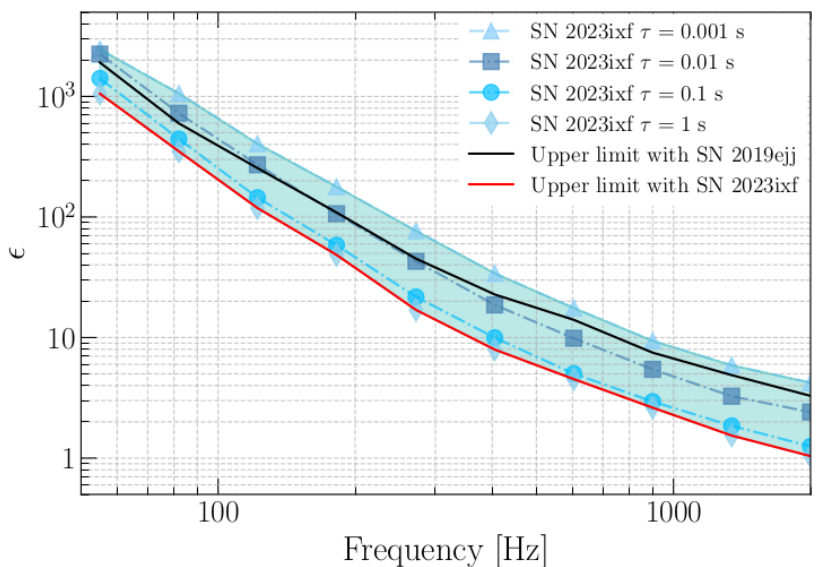


Figura 4: Limiti superiori sull'ellitticità della PNS in funzione della frequenza per segnali emessi nel caso di instabilità a barra, con un'efficienza di rivelazione del 50% e di una frequenza di falsi allarmi di 2,1 al giorno. La regione ombreggiata contiene i risultati di un'ampia gamma di durate del segnale gravitazionale data dal parametro τ nella legenda. Il parametro ellitticità indica quanto la forma della stella si discosti da una sfera regolare. I migliori limiti superiori si ottengono per i segnali gravitazionali ad alte frequenze.

GLOSSARIO

Limite di Chandrasekhar: la più alta massa che in teoria una nana bianca può avere e rimanere una nana bianca. Al di sopra di questa massa ($1.4 M_{\odot}$), la pressione di degenerazione degli elettroni non è sufficiente ad impedire alla gravità di far collassare ulteriormente la stella in una stella di neutroni o in un buco nero.

Gas degeneri di elettroni: un gas di elettroni confinati in un volume finito, avente un'elevatissima densità.

Principio di esclusione di Pauli: in meccanica quantistica, il principio di esclusione di Pauli afferma che due particelle identiche con spin quantistico semi-intero (chiamate anche *fermioni*) non possono occupare contemporaneamente lo stesso stato quantico. Questo principio è stato formulato per la prima volta dal fisico austriaco Wolfgang Pauli nel 1925 per gli elettroni.

Supernova da collasso del nucleo: un evento esplosivo che si verifica quando il nucleo di una stella massiccia collassa su sé stesso a causa della gravità, provocando una supernova che emette enormi quantità di energia e spesso lascia dietro di sé una stella di neutroni o un buco nero.

Gruppo Locale: un insieme di oltre 50 galassie, tra cui la Via Lattea, la galassia di Andromeda e la galassia del Triangolo, che sono legate gravitazionalmente all'interno di una regione di circa 10 milioni di anni luce di diametro.

Supernova di tipo II: un tipo di esplosione stellare che si verifica alla fine del ciclo di vita di una stella massiccia. Queste supernove sono caratterizzate dalla presenza di righe di idrogeno nei loro spettri.

Instabilità da shock da accrescimento stazionario: un movimento irregolare su larga scala del fronte d'urto in stallo, che in genere dura per una frazione di secondo dopo il collasso e può influenzare in modo critico la convezione.

Curva di luce: grafico che mostra l'evoluzione temporale dell'intensità luminosa emessa da un oggetto astronomico. L'intensità della luce viene solitamente misurata in una particolare banda di frequenza.

Shock breakout: l'istante d'uscita dell'onda d'urto dalla fotosfera stellare, che corrisponde ai primi segnali elettromagnetici rilevabili dalle supernovae da collasso del nucleo.

Supergigante rossa: la categoria di stelle più grandi dell'universo in termini di volume e con una luminosità nella classe delle stelle supergiganti.

Filtro ottimale: metodo di analisi che utilizza la correlazione tra i dati osservati ed un segnale teorico. Viene utilizzato per rivelare le onde gravitazionali emesse dalle coalescenze di oggetti binari per i quali abbiamo delle buone forme d'onda teoriche.

Instabilità a barra: un fenomeno che può verificarsi in stelle in rapida rotazione o nel residuo di un collasso stellare. È un tipo di instabilità rotazionale in cui la forma della stella o del nucleo devia dalla simmetria sferica e assume una struttura allungata.

Proto-stella di neutroni: ciò che resta del nucleo di una stella con una massa inferiore a circa 20 masse solari dopo il collasso gravitazionale. La densità è dell'ordine di $10^{14} \text{ g cm}^{-3}$. Ha una temperatura molto elevata, fino ad un'energia 50 MeV per barione.