

Possiamo rivelare le onde gravitazionali da nuvole di bosoni vettori?

Le **onde gravitazionali** (abbreviato in GW, dall'inglese Gravitational Wave) possono essere usate per studiare fenomeni esotici nella fisica delle particelle elementari, in aggiunta a quelli noti grazie agli esperimenti agli acceleratori sulla Terra: un esempio è offerto dai 'bosoni vettori ultraleggeri'. La collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) ha condotto la prima ricerca diretta di onde gravitazionali da nuvole di bosoni vettori ultraleggeri attorno a buchi neri noti. In mancanza di una rivelazione, siamo in grado di stabilire come poco probabile l'esistenza di vettori bosone con massa di circa 1×10^{-13} **elettronvolt** [eV].

Che cosa sono le nuvole di bosoni ultraleggeri?

I **bosoni** ultraleggeri sono una ipotetica classe di particelle con massa molto piccola (inferiore a 10^{-6} eV) predetta in molte estensioni del **Modello Standard** della fisica delle particelle e potrebbero formare nuvole attorno a buchi neri rotanti (Figura 1). Poiché ci si aspetta che interagiscano molto poco con l'ambiente circostante, sono un candidato eccellente per costituire la **materia oscura**. In questo studio abbiamo cercato in particolare bosoni vettori, che hanno **spin** $s = 1$: essi sono cugini dei bosoni scalari ($s = 0$) e tensori ($s = 1$) che sono pure teorizzati. In passato abbiamo già ricercato nuvole di bosoni scalari attorno a buchi neri in rotazione: si veda [qui](#) per maggiori dettagli.

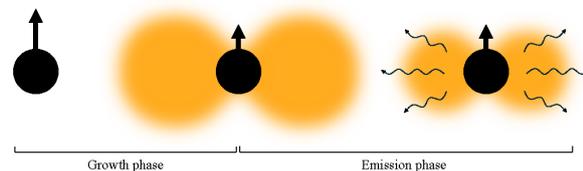


Figura 1: Rappresentazione schematica della crescita **superradiante** e dello svuotamento di una nuvola bosonica attorno a un buco nero rotante. Nello schema il processo è diviso in due fasi: la fase di crescita, durante la quale il buco nero perde massa-energia a favore della nuvola bosonica in crescita, e la fase di emissione di onde gravitazionali, molto più lunga, in cui la nuvola di bosoni perde energia appunto per emissione di onde gravitazionali.

Come le cerchiamo?

Come collaborazione LVK abbiamo considerato due tipi di buchi neri usando i dati della prima parte del quarto periodo osservativi (denominato O4a): i buchi neri che sono il residuo delle fusioni dei sistemi binari compatti [GW230814](#) e [GW231123](#), e il buco nero galattico nel sistema binario di [Cygnus X-1](#). Questa particolare scelta è motivata dal fatto che questi buchi neri hanno una massa grande, spin elevato, e/o sono relativamente vicini: tutte informazioni che conosciamo abbastanza bene da permetterci di modellare con buona precisione i loro possibili segnali di onda gravitazionale. D'altra parte ciascuna sorgente ha i suoi vantaggi e svantaggi. In particolare, un vantaggio di focalizzarci su Cygnus X-1 è la sua estrema vicinanza – si trova nella nostra galassia, a soli 7000 **anni luce** da noi – mentre gli altri buchi neri, che risultano dalle fusioni, distano miliardi di anni luce da noi e risiedono in lontane galassie. D'altra parte un vantaggio di indirizzare la ricerca sui residui delle fusioni viene dal fatto che conosciamo con precisione quando e come questi buchi neri hanno avuto origine, mentre invece il buco nero in Cygnus X-1 ha una età ed una storia molto più incerte.

Poiché questi due tipi di buchi neri hanno caratteristiche molto dissimili, abbiamo usato due metodi diversi per cercare un loro possibile segnale di onda gravitazionale: un metodo basato su un **modello di Markov nascosto** (abbreviato in HMM, dall'inglese hidden Markov model) adatto per buchi neri isolati di recente formazione – come i residui di fusioni di sistemi binari compatti –, e il metodo Binary BSD-VBC adatto per buchi neri vecchi in sistemi binari. HMM è un metodo di ricerca flessibile e che è adatto per segnali che evolvono rapidamente o in modo inatteso. Il metodo BSD invece funziona meglio per sorgenti la cui frequenza del segnale non evolve molto ma viene modulata per **effetto Doppler** a causa del moto della sorgente nel sistema binario.

Che cosa abbiamo trovato?

Nei dati della collaborazione LVK non abbiamo trovato segnali gravitazionali compatibili con quelli che ci aspettiamo di ricevere da nuvole di bosoni vettori. Ci chiediamo pertanto quale sia la probabilità che i bosoni vettori ultraleggeri esistano davvero.

Dopo una rigorosa analisi statistica, siamo in grado di rispondere a questa domanda... più o meno. I risultati di questa ricerca focalizzata sui buchi neri risultati dalle fusioni di sistemi binari possono essere usati (si veda Figura 2) per stabilire che sia poco probabile l'esistenza di bosoni vettori con massa compresa negli intervalli $[0.94, 1.08] \times 10^{-13}$ eV, $[2.75, 3.28] \times 10^{-13}$ eV, anche se questo risultato non è molto significativo dal punto di vista statistico. Ciò cambierà in futuro, quando la maggiore sensibilità dei rivelatori ci permetterà di escludere alcuni intervalli di massa con una significatività statistica sempre maggiore. In base allo studio che ha riguardato il buco nero in Cygnus X-1 (Figura 3), e sulla base di alcune assunzioni sull'età e condizioni iniziali del buco nero, possiamo escludere con un **livello di confidenza del 95%** l'esistenza di bosoni vettori con massa compresa nell'intervallo $[0.85, 1.59] \times 10^{-13}$ eV.

Perché è importante?

Il fatto non aver trovato nulla non significa che i bosoni vettori ultraleggeri non esistano; significa piuttosto che è meno probabile che esistano in alcuni intervalli di massa. A mano a mano che indirizzeremo la ricerca verso più buchi neri e con il futuro miglioramento della sensibilità dei rivelatori, succederà che o riveleremo segnali di onda gravitazionale prodotti da bosoni ultraleggeri o metteremo insieme tutti i nostri risultati di mancata rivelazione come quelli ottenuti da altri studi complementari fino a escludere del tutto la loro esistenza. In entrambi i casi questo studio è una importante dimostrazione di come i rivelatori di onde gravitazionali possano essere usati come banchi di prova di nuova fisica, e anche forse smascherare finalmente l'identità della materia oscura.

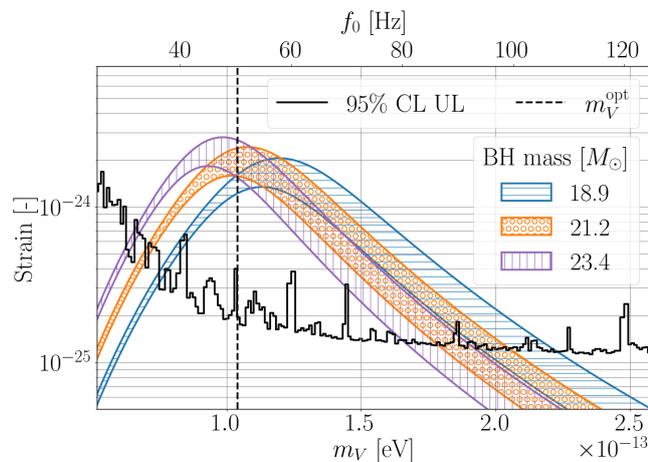


Figura 3: Limiti superiori (curva nera) per l'ampiezza delle onde gravitazionali (strain in inglese) emesse da una nuvola di bosoni vettori attorno a Cygnus X-1, in funzione della massa del bosone (asse inferiore) e della frequenza del segnale (asse superiore), con un livello di confidenza del 95% e in base al fatto che nessun segnale è stato osservato. Le aree colorate indicano l'ampiezza di strain predetta. Per interpretare questi risultati possiamo guardare dove la curva nera è più bassa delle aree colorate: questo è l'intervallo di massa del bosone in cui un segnale sarebbe stato rivelato, se presente: la non rivelazione sfavorisce l'esistenza di un bosone in questo intervallo di massa, al 95% di confidenza.

Per saperne di più

Leggi gratuitamente l'anteprima dell'articolo scientifico:

<https://dcc.ligo.org/P2500256/public> oppure su arxiv

Traduzione a cura di Livia Conti e Edoardo Milotti. Versione originale:

<https://ligo.org/science-summaries/O4aVectorBoson/>

LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary, 9 settembre 2025.

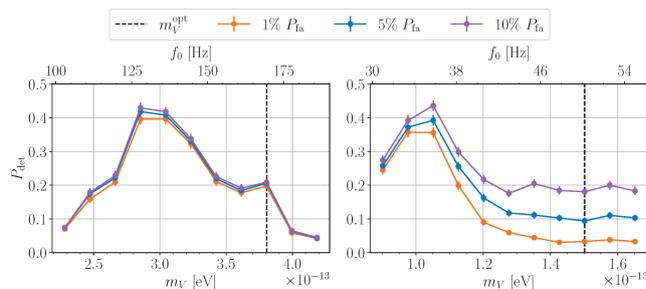


Figura 2: Stima della **significatività statistica** (probabilità) (P_{det}) con cui possiamo escludere l'esistenza di bosoni vettori con una data massa (m_V), asse orizzontale inferiore) sulla base del fatto che le ricerche mirate verso i buchi neri prodotti nelle fusioni GW230814 (pannello di sinistra) e GW231123 (pannello di destra) non hanno rivelato alcun segnale. Come esempio per l'interpretazione di questi risultati, consideriamo una probabilità di falso allarme dell'1% (curve arancioni - legenda in alto): in tal caso l'intervallo di masse con $P_{det} > 0.3$ è escluso con una probabilità del 30%. Anche se questo non corrisponde ancora a una sicura esclusione, osservazioni future ci permetteranno di verificare meglio questi intervalli di massa dei bosoni.

Glossario

Binary BSD-VBC: Un metodo di analisi che corregge i dati tenendo conto dello spostamento Doppler dovuto al moto orbitale della sorgente; esso cerca segnali persistenti in mappe tempo-frequenza costruite con trasformate di Fourier brevi e con un approccio del tipo trasformata di Hough.

GW230814: Un evento GW rivelato da LVK il 14 agosto 2023 con rapporto segnale-rumore molto alto. Si tratta della fusione di un sistema binario di buchi neri con masse simili a GW150914, osservata solo dal rivelatore LIGO a Livingston.

GW231123: Un evento GW rivelato da LVK il 23 novembre 2023. Si tratta della fusione del più grande sistema binario di buchi neri ad oggi, con un buco nero finale di 220 masse solari. Uno od entrambi i buchi neri nel sistema binario potrebbe essere nella regione di 'mass gap' superiore, una regione nell'intervallo di masse dei buchi neri che dovrebbe essere poco popolata in base ai modelli di evoluzione stellare.

Strain: la variazione relativa della distanza tra due punti per effetto della deformazione dello spaziotempo prodotta dal passaggio di una GW. Lo strain tipico anche nel caso di segnali GW molto forti che arrivano sulla Terra è molto piccolo, inferiore a 10^{-21} .



Visita i nostri siti web:

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