A CACCIA DI BUCHI NERI MENO MASSICCI DEL SOLE CON LE ONDE GRAVITAZIONALI

Ogni periodo osservativo della rete di rivelatori di onde gravitazionali LIGO/Virgo/KAGRA (LVK) ci consente di rivelare un numero sempre maggiore di sorgenti, in particolare il numero di fusioni di sistemi binari di oggetti compatti osservate è superiore a 200, e di effettuare ricerche sempre più approfondite di sorgenti che non sono ancora state osservate. Tra queste ultime, le fusioni di oggetti compatti con masse inferiori alla massa del Sole (indicata dal simbolo $M_\odot$) sono tra le più interessanti. Sebbene non si conosca alcun processo astrofisico che porti alla formazione di oggetti così leggeri a partire dalle normali stelle (si veda la **Figura 1**), si possono ipotizzare processi che potrebbero aver dato origine a buchi neri primordiali all'inizio dell'Universo.

Le fusioni di oggetti leggeri non emettono onde gravitazionali intense come quelle dei sistemi più pesanti, ma i nostri rivelatori potrebbero comunque rivelare tali sorgenti nel caso in cui non siano troppo distanti (tipicamente entro un decimo di gigaparsec). Se li trovassimo, potremmo portare alla luce nuovi aspetti fisici. Nella prima parte del quarto periodo osservativo della collaborazione LVK (O4a), i rivelatori LIGO hanno raccolto dati con una sensibilità senza precedenti, aumentando la loro portata dal 15% al 45% rispetto al terzo periodo osservativo, sondando quindi un maggiore volume dell'Universo.

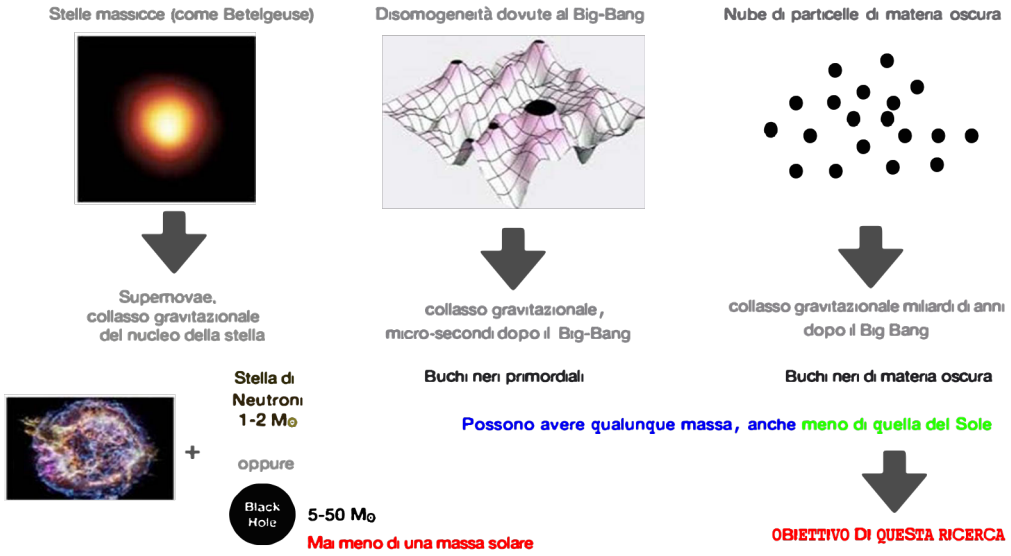


Figura 1: Schizzo che illustra diversi processi di formazione degli oggetti compatti che possono essere osservati dalla collaborazione LVK. Oltre alle stelle di neutroni e ai buchi neri ("black holes" in inglese) formati nel corso dell'evoluzione stellare, esistono ipotetici buchi neri primordiali o formati da materia oscura che potrebbero esistere nell'Universo ed essere meno massicci del nostro Sole.

Utilizzando tre algoritmi di ricerca indipendenti (chiamati GstLAL, MBTA, PyCBC, tutti basati sulla nostra conoscenza delle forma d'onda attese ma diversi nei metodi utilizzati per separare i segnali dal rumore di fondo e stimarne la significatività statistica), abbiamo analizzato i dati O4a per cercare fusioni di oggetti di massa subsolare, dove l'oggetto più leggero nel sistema binario ha una massa compresa tra 0.2 $M_\odot$ e 1 $M_\odot$ e quello più pesante una massa compresa tra 0.2 $M_\odot$ e 10 $M_\odot$. Per contestualizzare questa ricerca ricordiamo che gli oggetti compatti più leggeri osservati finora con le onde gravitazionali hanno tutti masse maggiori di 1 $M_\odot$, mentre gli osservatori elettromagnetici hanno trovato una stella di neutroni leggera con una massa stimata intorno a 0.8 $M_\odot$.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

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

La ricerca non ha trovato nessun buco nero con massa subsolare (ma ha trovato GW230529, si veda il science summary di questa scoperta entusiasmante). Tuttavia, la mancata osservazione ci permette di dedurre dei limiti superiori alla frequenza di fusioni di buchi neri con massa subsolare (si veda la **Figura 2**). Per farlo, calcoliamo la sensibilità della nostra ricerca applicandola a segnali simulati di fusioni binarie di buchi neri con massa subsolare iniettati nel rumore di fondo rilevato in O4a.

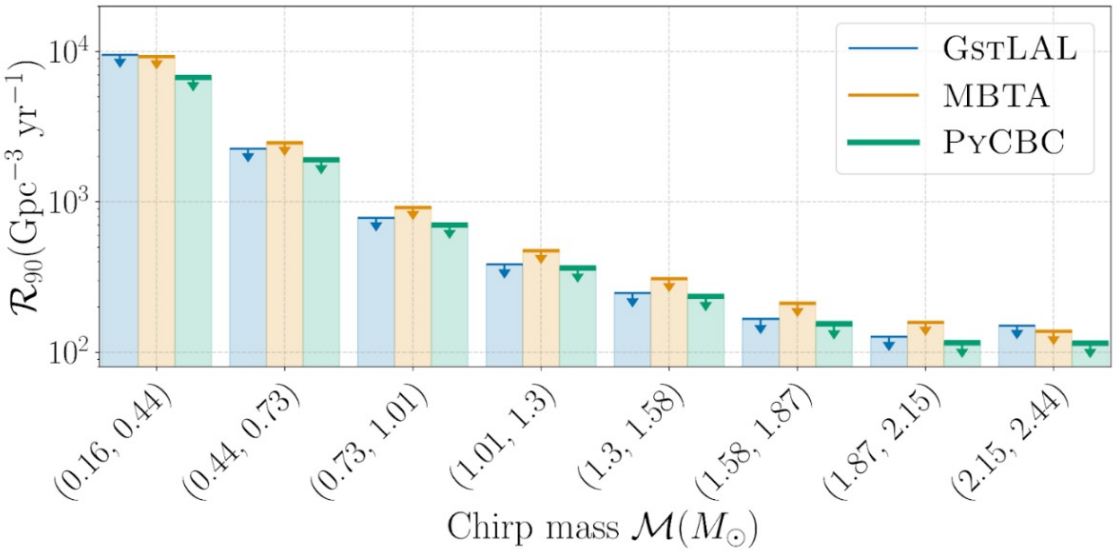


Figura 2: (Figura 5 dell'articolo): Limiti superiori alla frequenza di fusione di sistemi di buchi neri binari con massa subsolare, in funzione della massa di chirp, che è una combinazione delle due masse dei buchi neri e rappresenta la massa efficace del sistema binario. I limiti superiori si deducono dall'assenza di osservazioni di questo tipo nei dati O4a e dalla stima della sensibilità della ricerca effettuata da ciascuno degli algoritmi utilizzati.

Per la prima volta, calcoliamo anche la sensibilità della nostra ricerca nel caso in cui gli oggetti del sistema aventi massa subsolare siano stelle di neutroni. Sebbene non ci si aspetti che le stelle di neutroni abbiano masse inferiori a quelle del Sole, se tali stelle di neutroni a bassa massa esistono, allora gli effetti di marea nella dinamica del sistema binario, in cui l'attrazione gravitazionale di una stella induce una deformazione nell'altra, dovrebbero giocare un ruolo importante. Questo perché la deformazione, poco importante nelle stelle di neutroni tipiche, diventerebbe significativa nelle stelle a bassa massa. Poiché la nostra ricerca ipotizza che gli oggetti siano buchi neri, che sono equivalenti a particelle puntiformi senza effetti di marea, potrebbe essere che il segnale dovuto a una fusione di stelle di neutroni con massa subsolare sia sottilmente diverso da quello che osserviamo. Quantifichiamo la sensibilità della ricerca in questo caso specifico applicandola a fusioni simulate di stelle di neutroni binarie con masse subsolari.

I limiti superiori della frequenza delle fusioni possono essere trasformati in vincoli sui modelli di materia oscura che prevedono fusioni binarie di buchi neri con massa subsolare. Uno di questi modelli prevede che i buchi neri primordiali si siano formati all'inizio dell'Universo e abbiano poi prodotto i sistemi binari che alla fine si fondono. Abbiamo calcolato i valori massimi per la frazione di materia oscura che i buchi neri primordiali potrebbero rappresentare, a seconda di varie ipotesi sulla loro massa e sullo scenario di formazione dei sistemi binari. Un'altra classe di modelli considera la possibilità che la materia oscura sia composta da particelle (sconosciute) che possono interagire con l'ambiente in modo da formare accumuli in regioni dense e infine collassare formando buchi neri. Questi sono chiamati buchi neri oscuri poiché avrebbero origine dalla materia oscura. I buchi neri oscuri possono quindi formare sistemi binari e fondersi, producendo un segnale gravitazionale. Sebbene ancora una volta questa ricerca non abbia prodotto risultati, il risultato nullo ci permette di limitare la frazione di materia oscura composta da buchi neri oscuri, tenendo conto dell'intervallo di massa subsolare che abbiamo considerato.

Il periodo osservativo O4 è proseguito fino a novembre 2025 e ha accumulato molti più dati di quelli che abbiamo analizzato, il che offre l'opportunità di approfondire la ricerca e la possibilità di effettuare una osservazione o di stabilire vincoli più stringenti. Restate sintonizzati!

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

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

Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo qui o su arXiv.