

RICERCA DI BUCHI NERI CON MASSA INFERIORE A QUELLA DEL SOLE

Onde gravitazionali da piccoli buchi neri

LIGO e Virgo hanno scoperto molte coppie di buchi neri a partire dalle onde gravitazionali che hanno emesso durante le fasi finali del loro avvicinamento e durante la successiva fusione; ci chiediamo se sia possibile rivelare in questo modo anche buchi neri molto piccoli. Abbiamo usato i dati di LIGO e Virgo presi a partire dal 1 aprile fino al 1 ottobre 2019 per cercare buchi neri con massa fino ad un quinto di quella del Sole, impiegando 3 diversi algoritmi basati sul metodo dei **filtri ottimali**. La ricerca copre un intervallo di massa e spin dei buchi neri più grande delle [passate analisi](#). Non abbiamo trovato alcun segnale di oggetti compatti al di sotto di una massa solare.

La mancata rivelazione di questi segnali ci permette di mettere nuovi limiti alla **frequenza della densità di fusioni** di buchi neri di massa subsolare. Questi limiti si possono tradurre in vincoli sui parametri dei modelli astrofisici che possono generare sistemi binari con masse subsolari. Nella Figura 1 mostriamo i vincoli sul contributo dei **buchi neri primordiali** alla composizione della **materia oscura**. Considerando una popolazione di buchi neri di uguale massa, l'asse orizzontale mostra la massa dei buchi neri in ciascun modello e l'asse verticale rappresenta i vincoli sulla frazione di materia oscura costituita da buchi neri primordiali (f_{PBH}). Le diverse linee colorate nella figura rappresentano vincoli posti da diversi esperimenti: le linee arancioni sono i vincoli ottenuti tramite il **microlensing**; le linee verdi provengono da osservazioni della dinamica delle galassie nane [Segue I](#) e [Eridanus II](#); le linee blu vengono dal **lensing delle supernove**; infine le linee viola sono i risultati di LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) ottenuti nel primo e secondo periodo osservativo (O1 e O2), e quelli che otteniamo da questa analisi della prima parte del terzo periodo osservativo (O3a). I nostri nuovi risultati migliorano significativamente i vincoli ottenuti con il microlensing e con il lensing delle supernove, così come quelli che avevamo ottenuto con i dati di O1 e O2; abbiamo ottenuto un limite superiore sull'abbondanza di questi buchi neri in funzione della loro massa iniziale, con $f_{\text{PBH}} \lesssim 5\%$. Nella [Figura 2](#) mostriamo gli stessi vincoli per buchi neri che si sono formati dal collasso degli **aloni di materia oscura** (DBH, dall'inglese Dark Matter Halos). Il più basso tra i limiti superiori corrisponde ad una massa solare, dove $f_{\text{PBH}} \lesssim 0.002\%$.

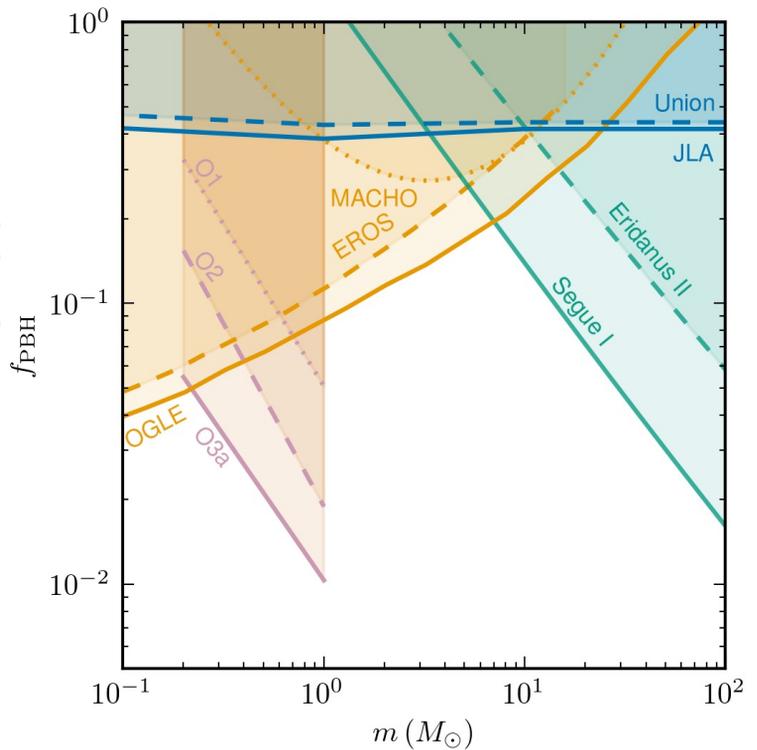


Figura 1: Vincoli sulla frazione di materia oscura nei buchi neri primordiali. L'asse orizzontale mostra la massa del buco nero, l'asse verticale mostra il limite superiore sulla frazione di materia oscura attribuibile ai buchi neri. Il significato delle regioni colorate è spiegato nel testo principale

Se i rivelatori di LIGO-Virgo osserveranno onde gravitazionali da un sistema binario di due oggetti compatti in cui almeno uno dei due componenti ha una massa subsolare, ci troveremo di fronte ad una sfida alla nostra comprensione dell'**evoluzione stellare**, e forse anche ad un segnale di nuova fisica.

Se i rivelatori di LIGO-Virgo osserveranno onde gravitazionali da un sistema binario di due oggetti compatti in cui almeno uno dei due componenti ha una massa subsolare, ci troveremo di fronte ad una sfida alla nostra comprensione dell'**evoluzione stellare**, e forse anche ad un segnale di nuova fisica.

La vita e la morte turbolenta delle stelle

Le stelle trascorrono la maggior parte della loro vita in uno stato di equilibrio, in cui le reazioni di **fusione nucleare** generano una pressione che spinge la materia verso l'esterno e contrasta la spinta verso l'interno dovuta alla forza di gravità. In funzione della massa di una stella, le reazioni nucleari possono durare milioni o anche miliardi di anni. Le stelle più pesanti splendono di luce più intensa e consumano più velocemente il loro combustibile, vivendo così delle vite più brevi.

Il combustibile nucleare di stelle giovani come il nostro Sole è principalmente idrogeno. Quando una stella ha convertito tutto l'idrogeno nel suo nucleo in elio, le reazioni nucleari non riescono più a sostenere la materia contro la forza di gravità, e la stella inizia a collassare. La stella in contrazione raggiunge temperature più alte nelle sue regioni più interne e, se la sua massa è sufficientemente grande, possono iniziare nuove fusioni nucleari che utilizzano l'elio, o anche elementi più pesanti. La stella passa attraverso diverse fasi di equilibrio, finché alla fine le condizioni per l'accensione di ulteriori reazioni nucleari non possono più venire soddisfatte. A questo punto la stella inizia a collassare, e i **modelli di evoluzione stellare** prevedono diverse possibilità, ancora una volta in funzione della massa iniziale. Nelle stelle leggere, con una massa inferiore a 10 masse solari, la pressione di degenerazione degli elettroni è sufficiente per interrompere il collasso gravitazionale e le stelle diventano nane bianche. Per contro, stelle più pesanti diventano **stelle di neutroni**, e stelle ancora più massicce, con massa iniziale superiore a circa 25 masse solari, diventano buchi neri.

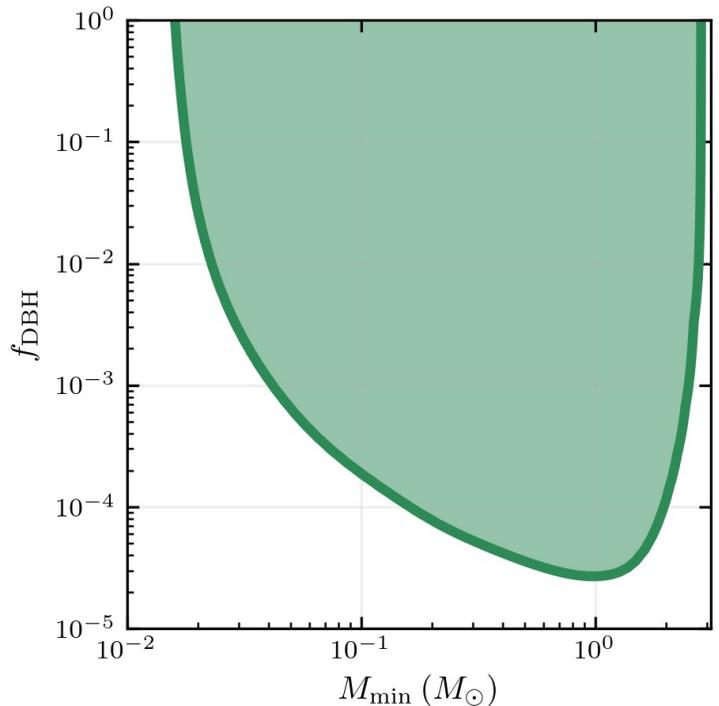


Figura 2: Vincoli sulla frazione di materia oscura corrispondente a buchi neri formati dal collasso gravitazionale di **aloni di materia oscura**. L'asse orizzontale mostra la minima massa possibile di buchi neri che si formano con questo meccanismo.

I modelli di evoluzione stellare prevedono che né i buchi neri né le stelle di neutroni possano essere **oggetti compatti di massa subsolare**. È un dato di fatto che le più leggere stelle di neutroni osservate finora hanno una massa leggermente superiore ad una massa solare, mentre i buchi neri prodotti dall'evoluzione stellare sono oggetti più pesanti.

Cosa potrebbero essere gli oggetti pesanti di massa subsolare?

Diversi modelli mettono gli oggetti compatti di massa subsolare in relazione con la **materia oscura**. La materia oscura è una forma ipotetica di materia che non emette alcuna luce, rendendo così difficile la sua rivelazione. In questa sua oscurità assomiglia ai buchi neri, e la si può percepire solo grazie agli effetti gravitazionali.

Non sappiamo quali possano essere gli elementi costitutivi della materia oscura, ma si pensa che quest'ultima rappresenti la maggior parte della materia dell'universo. Un'interessante possibilità è che essa sia costituita da nuovi tipi di particelle fondamentali che interagiscono principalmente per mezzo della gravità.

Visitate i nostri siti web

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



In questo contesto i teorici predicono che regioni con un'elevata densità di particelle di materia oscura possano collassare in buchi neri che non si possono spiegare con i processi astrofisici noti. In alternativa, particelle ultraleggere potrebbero aggregarsi e formare oggetti compatti di massa molto piccola noti come stelle di bosoni. Inoltre le particelle di materia oscura potrebbero interagire con le stelle di neutroni provocando un collasso gravitazionale che le trasforma in buchi neri, e formando alla fine un oggetto compatto di massa subsolare. Tutte queste possibilità sono al momento oggetto di indagine.

Ancora un'altra possibilità è che la materia oscura sia composta non solo di particelle ma anche di buchi neri che si sono formati nei primi istanti dell'Universo, grazie al collasso gravitazionale di regioni di altissima densità. Questi ultimi sono noti come buchi neri primordiali, e possono avere masse inferiori ad una massa solare.

L'analisi della seconda parte di O3 (chiamata O3b) è attualmente in corso ed è possibile che alla fine sia possibile rivelare un evento di fusione con massa subsolare, oppure che vengano migliorati i vincoli sull'abbondanza di questi oggetti nell'Universo. Inoltre, Advanced LIGO, Advanced Virgo e [KAGRA](#) inizieranno un nuovo periodo osservativo nel 2022, con una sensibilità ancora più alta!

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu Leggete gratuitamente [qui](#) l'articolo completo.

GLOSSARIO

Buco nero: Una regione dello spazio-tempo in cui la gravità è così intensa che nulla può sfuggire, neppure la luce.

Filtro ottimale: Metodo di analisi dati che consiste nel correlare i dati con una forma d'onda simulata per cercare di identificare un segnale con quella forma nascosto nel rumore del rivelatore.

Spin: Quantità che misura la velocità di rotazione di un oggetto intorno a se stesso.

Densità della frequenza di fusioni: Il numero di oggetti compatti che si fondono in un anno per unità di volume spaziale.

Buco nero primordiale: Ipotetico buco nero che si è formato agli inizi della vita dell'Universo. Fluttuazioni della densità di energia nell'Universo potrebbero avere prodotto regioni di densità così elevata da collassare spontaneamente formando buchi neri. Dal momento che i buchi neri primordiali non si formano a partire dal collasso di stelle massicce, è concepibile che abbiano masse inferiori ad una massa solare.

Materia oscura: Questa misteriosa forma di materia costituisce circa l'85% della massa dell'Universo. È oscura perché non emette luce né interagisce elettromagneticamente. Molte teorie della materia oscura la associano a qualche tipo di particella fondamentale, ma è interessante considerare la possibilità che gli oggetti più oscuri che conosciamo (i buchi neri!) possano costituire parte della materia oscura.

Microlensing: L'effetto di lente gravitazionale è un effetto ottico che si verifica quando una distribuzione di materia (come un ammasso di galassie) si trova tra una sorgente distante e un osservatore sulla Terra; la gravità di questa materia piega il cammino della luce, proprio come una lente. Se la lente è più piccola di una galassia (ad esempio una stella), l'effetto è noto come *microlensing*, e lo si osserva come un cambiamento di luminosità della sorgente.

Lensing delle supernove: L'effetto di lente gravitazionale causato da oggetti compatti lungo la linea di vista tra la Terra e una supernova di tipo I può amplificare la luminosità della supernova. Questo effetto dipende dai modelli di buchi neri primordiali e può venire utilizzato per vincolare la loro popolazione.

Alone di materia oscura: Si tratta della materia oscura che ipoteticamente permea e circonda le singole galassie.

Modelli di evoluzione stellare: Si tratta dei modelli matematici usati per studiare come i parametri fisici di una stella cambiano nel tempo, dal momento della nascita fino a quando essa diventa il relitto di una stella.

Fusione nucleare: La fusione nucleare ha luogo quando due nuclei si fondono assieme in un solo nucleo. Per elementi più leggeri del ferro questo corrisponde ad un rilascio di energia. Questa energia alimenta le stelle.

Pressione di degenerazione: La pressione di degenerazione è un effetto quantistico che avviene quando particelle identiche (come gli elettroni e i neutroni) non possono condividere lo stesso stato quantico. Il risultato è una pressione che può essere sufficiente a prevenire il collasso gravitazionale di una stella, anche dopo che tutto il suo combustibile nucleare è esaurito.

Stella di neutroni: Ciò che resta dopo il collasso di una stella massiccia. Si tratta di un oggetto estremamente denso, sostenuto dalla pressione di degenerazione dei neutroni.

Oggetto di massa subsolare: Un oggetto astrofisico viene detto oggetto di massa subsolare se la sua massa è inferiore a quella del Sole, indicata dal simbolo M_{\odot} .