

LIMITI OSSERVATIVI SULLE NUVOLE DI BOSONI CHE CIRCONDANO BUCHI NERI ROTANTI NELLA NOSTRA GALASSIA

Anche se siamo circondati dalla misteriosa **materia oscura**, non riusciamo a vederla. Essa potrebbe essere composta da particelle molto leggere note come **bosoni**, ciascuna con una massa di circa 10^{-47} kg (un numero piccolissimo che si scrive anche come "zero virgola" seguito da 46 zeri e quindi da un singolo 1). Queste particelle sono circa 20 ordini di grandezza più leggere di un elettrone! Se davvero esistono, potrebbero emergere casualmente accanto a **buchi neri** rotanti e diffondere, vale a dire rimbalzare, su di essi, estraendo in questo modo energia ed impulso dai buchi neri. Poiché questi bosoni hanno massa, e il buco nero esercita una potente attrazione gravitazionale, essi restano

legati al buco nero, diffondendo in passaggi successivi e estraendo così ancora altra energia e impulso. Non c'è limite al numero di bosoni che possono avere una particolare energia, e questo significa che è possibile che ce ne siano 10^{50} intorno al buco nero e che ne estraggano tutta l'energia!

Un numero così grande di particelle porta alla formazione di un'enorme nuvola di bosoni intorno al buco nero. A questo punto i bosoni si annichilano nel corso del tempo, nel senso che collidono gli uni contro gli altri, producendo onde gravitazionali con una frequenza piuttosto precisa, come se fosse un singolo tono musicale. Molto gradualmente, a causa dell'annichilazione dei bosoni, la nuvola si riduce sempre più fino a sparire, ma con un processo che può richiedere decine di migliaia di anni! Il tempo necessario alla formazione della nuvola è molto più breve del tempo di decadimento causato dall'annichilazione, e ciò significa che queste nuvole di bosoni emettono onde gravitazionali per tempi molto superiori a quelli di una vita umana.

Utilizzando i più recenti dati di LIGO, le collaborazioni **LIGO/Virgo/KAGRA** hanno cercato segnali di onde gravitazionali provenienti da nuvole di bosoni in decadimento che potrebbero essere ovunque nel cielo. Una ricerca di questo tipo è molto pesante dal punto di vista del calcolo perché dobbiamo analizzare ogni posizione del cielo separatamente per tutte le frequenze, dal momento che non conosciamo la massa delle particelle bosoniche, né la direzione del cielo in cui le nuvole potrebbero essersi formate. Il nostro metodo spezza un anno di dati in parti più piccole di poche ore al massimo, cerca un segnale monocromatico (vale a dire, a frequenza fissa) in ciascuna di queste parti, e successivamente le ricombina. Benché ci si aspetti un segnale monocromatico, vogliamo anche tenere conto delle incertezze nelle teorie che governano l'emissione di onde gravitazionali da nuvole bosoniche che decadono. Perciò consideriamo la possibilità che la frequenza dell'onda gravitazionale possa variare a caso nel corso del tempo. Non troviamo alcun segnale significativo né cambiando la massa dei bosoni, né la posizione nel cielo, e questo ci permette di mettere il **limite superiore** più stringente sull'esistenza delle nuvole bosoniche intorno a buchi neri in rotazione nella nostra galassia.

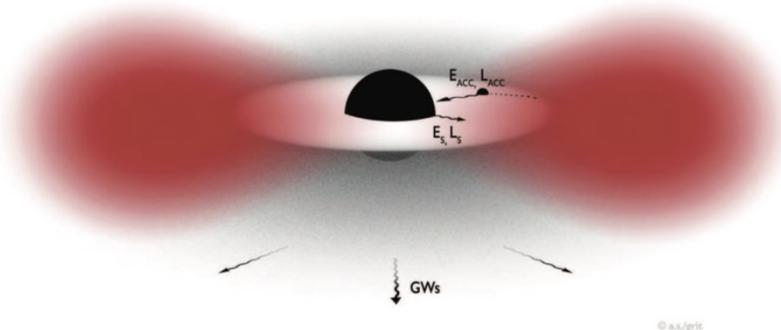


Figura 1: Disegno che mostra schematicamente il buco nero rotante circondato da una nuvola di bosoni (in rosso). La nuvola ha dimensioni macroscopiche ed ha una forma a due lobi che corrisponde allo stato di energia più bassa per i bosoni. Credito: Richard Brito, Vitor Cardoso, Paolo Pani, <https://arxiv.org/pdf/1501.06570.pdf>

PER SAPERNE DI PIÙ

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

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Interpretiamo questi limiti in due modi. Anzitutto, per una data distanza, spin ed età di un buco nero, calcoliamo l'ampiezza del segnale di onda gravitazionale che potrebbe venire generato da esso per diverse coppie di valori di massa del bosone/massa del buco nero. Se questa ampiezza è maggiore di quella ottenuta nell'analisi (che non assume esplicitamente un modello di nuvola bosonica in decadimento), possiamo escludere la presenza di una nuvola intorno ad un buco nero per masse del bosone comprese tra 10^{-13} e 10^{-12} eV ($\sim 10^{-47}$ a 10^{-46} kg) e masse del buco nero comprese tra 5 e 100 masse solari, rispettivamente. In secondo luogo, assumiamo un modello di distribuzione delle masse dei buchi neri, e per una data età della nuvola di bosoni e spin casuale dei buchi neri, calcoliamo fino a che distanza una nuvola composta da bosoni con una certa massa avrebbe potuto produrre un segnale abbastanza forte da essere rivelabile. Troviamo che la distanza massima a cui avremmo potuto essere sensibili a sistemi di buco nero/nuvola bosonica è di circa 100 kpc (oltre 300,000 anni luce)!

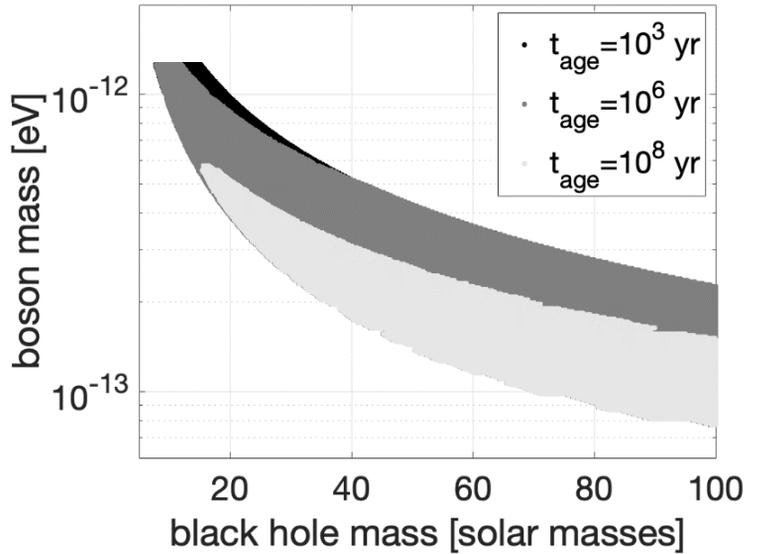


Figura 2: (Fig. 6 nell'articolo). Qui assumiamo sistemi di buchi neri e nuvole bosoniche si possano formare ad una distanza di 1 kpc con uno spin di 0.9 e che corrispondono a tre diverse classi di età. Nella figura mostriamo le regioni di massa dove possiamo escludere la presenza di una nuvola bosonica intorno ad un buco nero per le tre diverse classi di età. I buchi neri più giovani emettono onde gravitazionali più intense, quindi la regione di esclusione marcata in nero e corrispondente all'età $t_{age} = 10^3$ yr (mille anni) comprende le regioni corrispondenti ad età maggiori, e rappresenta dunque il vincolo più stringente.

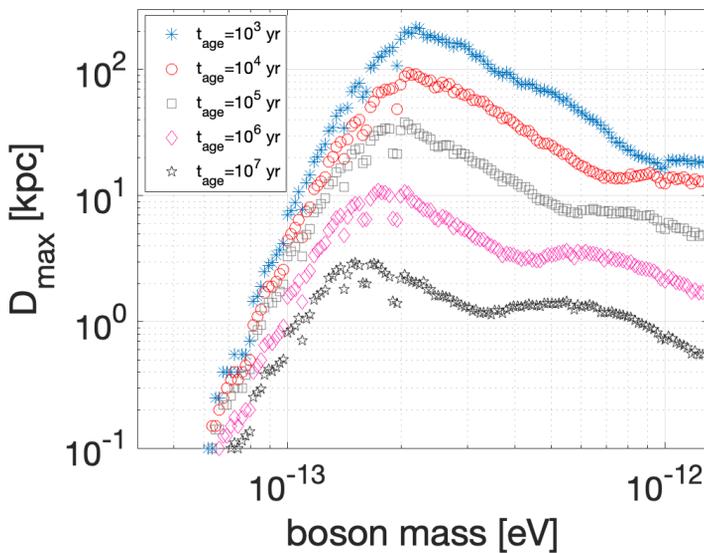


Figura 3: (Fig. 8 nell'articolo). Distanza massima raggiunta in funzione della massa del bosone, per una data età della nuvola, per spin casuali del buco nero, e masse del buco nero comprese tra 5 e 100 masse solari, scelte secondo una particolare distribuzione di massa che favorisce buchi neri leggeri. Si vede che i sistemi più giovani con $t_{age} = 10^3$ anni possono venire vincolati alla massima distanza da noi. Inoltre questi risultati dipendono dalla particolare popolazione di buchi neri che abbiamo scelto, e potrebbero cambiare se prendessimo masse, spin ed età distribuite in modo diverso.

GLOSSARIO

Materia oscura: Materia invisibile che contribuisce all'85% della materia nell'Universo. Non riusciamo a vederla, ma interagisce gravitazionalmente e quindi possiamo inferirne gli effetti su molti oggetti astrofisici, ad esempio sulle velocità delle stelle nella nostra galassia. Si veda anche [qui](#).

Bosoni: Una classe di particelle elementari (le altre sono chiamate fermioni). I bosoni hanno spin intero, mentre i fermioni hanno spin semi-intero. Per esempio il fotone, il portatore della forza per le onde elettromagnetiche, è un bosone di spin 1. Per ulteriori informazioni si veda [qui](#).

Buco nero: Una regione dello spazio tempo che esercita un'attrazione gravitazionale talmente forte che neppure la luce riesce a sfuggire. Una stella abbastanza massiccia esplosa alla fine della sua vita e lascia dietro di sé un buco nero. La sua massa può variare da una massa solare fino a 10^9 masse solari! Questi buchi neri "supermassicci" esistono anche al centro delle galassie.

Elettronvolt (eV): Unità di energia comunemente utilizzata in fisica atomica e delle particelle, per esempio per misurare quanta energia serve per rimuovere un elettrone da un atomo. A causa della relazione tra energia e massa stabilita da Einstein, $E=mc^2$, le masse delle particelle possono venire espresse in unità di energia divisa per il quadrato della velocità della luce, vale a dire in unità eV/c^2 . ([Wikipedia](#))

Kiloparsec (kpc): Mille parsec. Un [parsec](#) è un'unità di lunghezza astronomica che corrisponde circa a 3 anni luce o 30 milioni di miliardi di km.

LIGO: Il Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory (LIGO) è una coppia di rivelatori di onde gravitazionali negli Stati Uniti. Uno si trova vicino a Livingston, Louisiana, e l'altro vicino ad Hanford, Washington. Entrambi i rivelatori sono grandi interferometri laser, con due bracci perpendicolari lunghi 4 km, che tentano di misurare qualunque cambiamento della lunghezza relativa dei bracci dovuto al passaggio di un'onda gravitazionale.

Virgo: Un rivelatore di onde gravitazionali situato nei pressi di Pisa. Anch'esso è un interferometro laser, ma con bracci lunghi 3 km.

KAGRA: Un rivelatore sotterraneo di onde gravitazionali situato vicino a Toyama in Giappone. Anch'esso è un interferometro laser, ma con bracci lunghi 3 km, e con specchi raffreddati a bassa temperatura.

Spin: Momento angolare di un buco nero rotante; questa è una delle proprietà che definiscono i buchi neri, insieme alla loro massa e carica elettrica.

Limite superiore: Il massimo valore che può venire assunto da una data quantità in modo che sia ancora compatibile con i dati. Qui utilizziamo il concetto per mettere dei vincoli sull'accoppiamento dei fotoni oscuri a diverse frequenze. Usiamo un limite di credibilità del 95%, intendendo che c^2 è una probabilità del 95% che la quantità stia al di sotto di questo limite.