

I Buchi Neri Primordiali

Formazione e impatto cosmologico nell'Universo

Ilia Musco

INFN, Sapienza Università di Roma

ilia.musco@roma1.infn.it



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Abstract

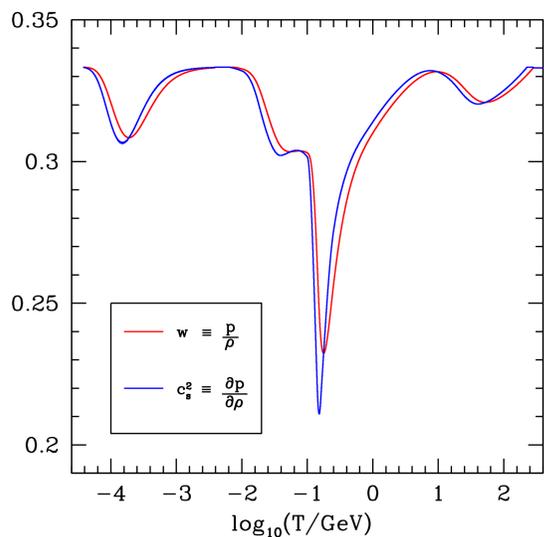
I buchi neri primordiali (denominati PBHs con l'acronimo inglese) si formano dal collasso gravitazionale di perturbazioni cosmologiche non lineari nell'Universo primordiale dominato da radiazione. La formazione di questi oggetti è particolarmente favorita durante le transizioni di fase a causa del "softening" dell'equazione di stato (i.e. la riduzione del rapporto tra la pressione e la densità di energia). Dalla transizione elettro-debole, corrispondente alla formazione di PBHs come candidati di materia oscura, fino alla Nucleosintesi, corrispondente alla formazione di PBHs che danno origine a buchi neri super massicci che popolano il centro delle galassie, questi oggetti spiegano la possibile origine delle strutture che si osservano oggi nell'Universo. Durante la transizione di fase quark-adroni la massa caratteristica di PBHs è di 1 - 3 masse solari, con un'abbondanza più di mille volte superiore rispetto alle altre fasi dell'Universo. Confrontando la distribuzione di massa di questi oggetti con il catalogo di onde gravitazionali GWTC-3, per mezzo di simulazioni numeriche si dimostra la possibilità che PBHs formati durante la transizione quark-adroni siano stati rivelati da LIGO/VIRGO attraverso l'emissione di onde gravitazionali durante la fusione ("merging") di buchi neri, come nel caso di GW190814 e altri eventi leggeri.

Obiettivi:

1. Determinare un criterio per la formazione dei PBHs in funzione dei parametri fondamentali del modello dell'Universo primordiale
2. Calcolare la probabilità di formazione di PBHs e la corrispondente distribuzione di massa.
3. Determinare la possibilità di osservare PBHs e le conseguenze osservative.

La storia dell'Universo primordiale

- L'Universo primordiale è dominato da un fluido di radiazione, descritto da un'equazione di stato dove la relazione tra la pressione p e densità di energia ρ è data dal rapporto costante ($p = \rho/3$).
- In generale l'equazione di stato dell'universo è determinata da due parametri fondamentali: il rapporto tra pressione e densità di energia ($w := p/\rho$) e la velocità del suono c_s^2 ($c_s^2 := \partial p/\partial \rho$).
- Nell'universo primordiale sono identificate, in ordine temporale, tre transizioni fondamentali:
 1. La Transizione Elettrodebole
 2. La Transizione Quark-Adroni
 3. La Nucleosintesi



La transizione quark-adroni, in particolare, mostra una variazione dell'equazione di stato particolarmente rilevante, dell'ordine del 30%, con un conseguente impatto sulla formazione di PBHs.

Formazione dei PBHs: ingredienti fondamentali

- I PBHs si formano se l'ampiezza δ della perturbazione, definita come il picco della funzione di compattezza \mathcal{C} , è maggiore di un valore di soglia critico δ_c , determinato dai gradienti di pressione che si oppongono al collasso gravitazionale.
- Il valore di δ_c dipende dall'equazione di stato e dalla configurazione della perturbazione.
- La configurazione della perturbazione è misurata da un parametro fondamentale α , definito dalla derivata seconda della funzione di compattezza misurata al picco, normalizzata rispetto all'altezza el picco stesso, dove l'ampiezza della perturbazione raggiunge il suo massimo.

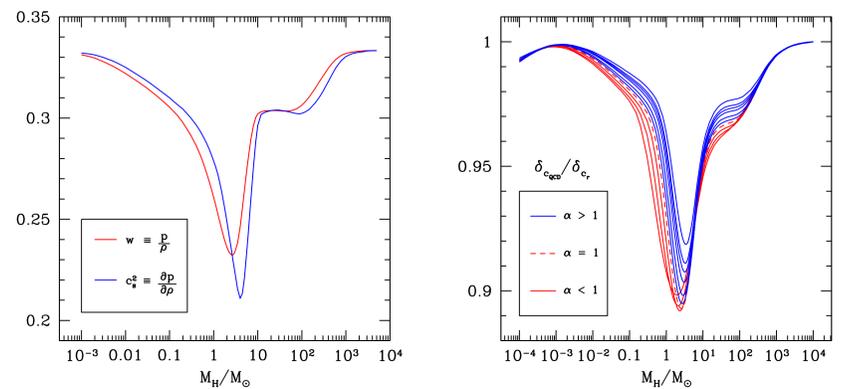
$$\alpha := -\frac{\mathcal{C}''(r_m)r_m^2}{4\mathcal{C}(r_m)}. \quad (1)$$

- Il valore medio di α può essere calcolato, utilizzando la statistica Gaussiana, dallo Spettro di Potenza delle perturbazioni cosmologiche [Musco, De Luca, Franciolini, Riotto PRD (2021)].

Risultati

Equazione di stato e valore critico

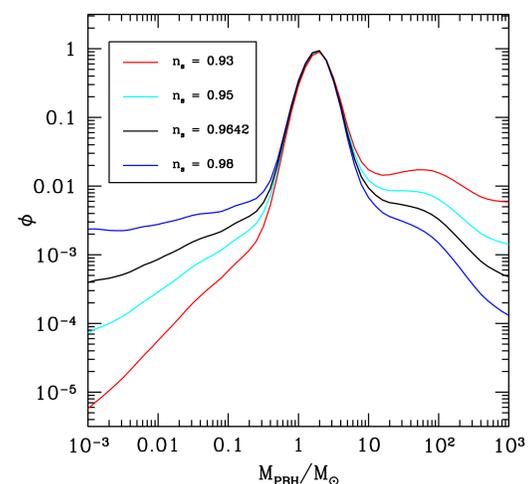
Il diagramma a sinistra mostra l'evoluzione dell'equazione di stato durante la transizione quark-adroni in funzione della massa dell'orizzonte cosmologico, mentre il diagramma a destra mostra la corrispondente variazione percentuale del valore critico δ_c rispetto allo scenario standard di un Universo primordiale dominato dalla radiazione ($p = \rho/3$).



Il valore critico δ_c decresce coerentemente con il comportamento di w e c_s^2 , raggiungendo un valore minimo inferiore di circa il 10% rispetto allo scenario di radiazione, in corrispondenza del valore minimo di w e c_s^2 .

Distribuzione di massa

Il valore critico δ_c e la conseguente relazione tra la massa dei PBHs in funzione dell'ampiezza della perturbazione permettono di calcolare la distribuzione di massa di questi oggetti nell'Universo di oggi. Questa funzione avrà un picco in corrispondenza del minimo dell'equazione di stato, corrispondente alla maggiore probabilità di collasso, con un'abbondanza complessiva più di mille volte superiore rispetto alla radiazione.



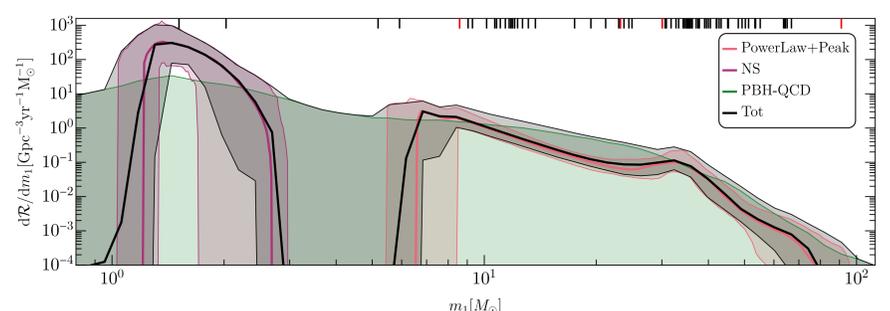
- Il comportamento delle code della distribuzione (e non il picco!) dipende dall'indice n_s dello spettro di potenza delle perturbazioni.

$$\mathcal{P}_\zeta(k) = A \left(\frac{k}{k_{\min}} \right)^{n_s-1} \quad (2)$$

- La forma dello spettro, parametrizzata dall'indice n_s , e la sua ampiezza, parametrizzata da A , determinano l'abbondanza dei PBHs, e quindi la possibilità di poterli osservare nell'Universo di oggi.

Distribuzione degli eventi di onde gravitazionali

I PBHs prodotti durante la transizione quark-adroni formano una sotto-popolazione di eventi di "merging" di buchi neri, in grado di spiegare quegli eventi caratterizzati da una delle due componenti del sistema binario particolarmente leggera, troppo grande per essere una stella di neutroni ma troppo piccola per essere un buco nero di origine stellare.



References

- G. Franciolini, I. Musco, P. Pani, A. Urbano *Physical Review D* **106** (2022) no.12, 123526
- I. Musco, K. Jedamzik, S. Young *e-Print*: 2303.07980 [astro-ph.CO] (to appear in PRD)