

# Collasso Gravitazionale e Teorie Scalar-Tensor della Gravità

Candidato: **Jacopo Soldateschi**

Relatore: **Prof. Niccolò Bucciantini** - niccolo.bucciantini@unifi.it

Correlatore: **Prof. Kostas Kokkotas** - kostas.kokkotas@uni-tuebingen.de

La teoria della Relatività Generale (GR) sembra non essere la teoria completa della gravità. Tra i principali problemi: (i) non spiega la natura di circa il 95% della massa-energia dell'universo; (ii) i tentativi di creare una teoria quantistica della gravità tramite la GR non portano a risultati consistenti; (iii) l'azione di Hilbert-Einstein non è l'unica scelta dell'azione gravitazionale che soddisfi il Weak Equivalence Principle. Per questi motivi vengono studiate le *teorie alternative della gravità*, tra le quali le *teorie scalar-tensor* (STTs). Queste prevedono l'aggiunta, nell'azione gravitazionale, di un campo scalare accoppiato in modo non minimale alla gravità.

In questo lavoro esaminiamo il collasso gravitazionale di una sfera di fluido politropico auto-gravitante nello scenario delle STTs. Ci focalizziamo su teorie contenenti il fenomeno non lineare chiamato "scalarizzazione spontanea", che permette evidenti deviazioni dalla GR in regimi di campo forte, mantenendo comunque soddisfatti i vincoli osservativi nei regimi di campo debole. Inoltre, studiamo il collasso anche nella teoria di Brans-Dicke (BD), la prima delle STTs ad essere stata formulata.

Abbiamo scritto un codice numerico che esegue il suddetto collasso in simmetria sferica; la nostra scelta di coordinate permette la formazione di un orizzonte degli eventi senza che sorgano problemi numerici. A seconda che la configurazione iniziale sia stabile o no, mostriamo come la sua oscillazione o il suo collasso a buco nero differiscono da quelli nella GR. La griglia numerica del codice si estende oltre la superficie della stella, permettendoci di rilevare onde gravitazionali scalari. Queste sono caratteristiche delle STTs; quindi, se rilevate dagli osservatori di onde gravitazionali, dimostrerebbero che la GR non è la teoria finale della gravità.

La presenza del campo scalare porta a delle modifiche delle curve massa-densità centrale e massa-raggio per le configurazioni statiche di un oggetto compatto. Questo accade perché il campo scalare esercita una pressione addizionale a quella del fluido, e questo permette alla stella di sostenere una massa maggiore all'aumentare del valore del campo scalare. Di conseguenza si presenta anche un aumento, rispetto alla GR, della sua massa massima; l'effetto dipende in modo cruciale dal valore dei parametri della teoria, oltre che dall'equazione di stato. I risultati ottenuti indicano che la presenza di scalarizzazione spontanea porta ad evidenti modifiche, rispetto alla GR, dei valori di massa e raggio. In casi estremi - che, tuttavia, sono esclusi dai vincoli osservativi - la massima massa per gli oggetti compatti studiati raggiunge quasi le  $5M_{\odot}$  (contro circa  $1.9M_{\odot}$  in GR), mentre il raggio massimo sfiora i 29km (contro i circa 13km in GR). Nel caso più realistico di parametri permessi dalle osservazioni si raggiungono quasi  $2.1M_{\odot}$ , mentre il raggio, fissata la massa, mostra un aumento di quasi 2km al massimo. Al contrario la teoria BD, nei limiti osservativi, presenta modifiche molto piccole: dell'ordine di  $10^{-5}M_{\odot}$  per le masse e di  $10^{-6}$ km per i raggi.

Nel processo dinamico del collasso, le quantità fluide e metriche subiscono in ogni caso solo modeste modifiche dovute alla presenza del campo scalare. Ad esempio, troviamo che il raggio della stella (nel caso in cui la configurazione iniziale sia stabile) o dell'orizzonte degli eventi (nel caso instabile) nelle STTs studiate è maggiore di quello in GR, mentre la densità centrale raggiunta nelle simulazioni è sempre minore di quella in GR. In ogni caso, le modifiche rispetto alla GR sono comunque più evidenti in presenza di scalarizzazione spontanea che nella teoria BD: la massima differenza che abbiamo trovato - in una teoria con scalarizzazione spontanea permessa dalle osservazioni - è di circa 2km per il raggio e di  $1 \times 10^{15} \text{g cm}^{-3}$  per la densità centrale.

La differenza principale con la GR sta nel fatto che vengono emesse onde gravitazionali scalari. I nostri risultati dimostrano che l'oscillazione o il collasso di oggetti compatti produce onde gravitazionali scalari con un range di frequenze che va dalle decine di Hz fino a circa  $10^4$ Hz: simile, ma più esteso nelle alte frequenze, allo spettro delle onde gravitazionali in GR delle core-collapse supernovae. La Power Spectral Density (PSD) nel caso di collasso a buco nero presenta una moltitudine di picchi tra circa 400Hz e  $5 \times 10^3$ Hz, mentre è liscia al di fuori di questo range; nel caso di oggetto stabile presenta invece meno picchi, tra circa 300Hz e  $2 \times 10^3$ Hz. Nel primo caso la PSD presenta il picco di massima potenza attorno a 400Hz; nel secondo caso attorno a 300Hz ed è un ordine di grandezza minore rispetto al primo caso. Confrontando la PSD con la sensibilità di Advanced LIGO e di Einstein Telescope, mostriamo che entro la Via Lattea queste onde scalari sono potenzialmente osservabili con rivelatori di onde gravitazionali di sensibilità confrontabile con Advanced LIGO, mentre quelle provenienti da distanze extra-galattiche saranno potenzialmente rilevabili dal futuro Einstein Telescope.