

# Materia oscura olografica

Dottorando: Tommaso Canneti (tommaso.canneti@unifi.it)

Tutori: Prof. Aldo Lorenzo Cotrone (cotrone@fi.infn.it)

## Introduzione

Al giorno d'oggi, si ritiene che circa il 26% del budget energetico dell'universo sia costituito da materia oscura [1]. La mancanza di evidenze sperimentali non-gravitazionali porta a pensare che eventuali *settori dark* siano debolmente accoppiati al modello standard. Al contempo, la possibilità di rilevare le onde gravitazionali [2] ha reso sperimentalmente accessibili fenomeni difficilmente sondabili con altri metodi. Per esempio, eventuali transizioni di fase cosmologiche del primo ordine costituirebbero una sorgente di onde gravitazionali (e.g., si veda [3]). Il modello standard non prevede transizioni di fase del primo ordine e, quindi, un segnale di onde gravitazionali prodotto in un contesto simile rappresenterebbe un segnale di nuova fisica.

Uno degli scenari studiati in letteratura prevede la possibilità di modellare i settori dark attraverso teorie di gauge QCD-like, le cui eccitazioni stabili costituiscono i candidati di materia oscura. Teorie del genere possono presentare transizioni di fase del primo ordine e vari modelli di questo tipo sono stati proposti nel corso degli anni (e.g., si veda [4]). In questi casi, però, le transizioni di fase avvengono spesso in regime di forte accoppiamento e la conseguente scarsità di controllo su di esse rende lo studio di tali fenomeni fisici semiquantitativo.

La corrispondenza olografica fornisce uno strumento estremamente potente per lo studio di teorie fortemente accoppiate, riducendo conti impervi di teoria di campo a calcoli di gravità classica. Recentemente, l'olografia è stata utilizzata per il calcolo dei parametri dello spettro delle onde gravitazionali emesse in transizioni di fase del primo ordine in una classe di modelli olografici QCD-like fortemente accoppiati e nel limite planare [5–7]. Nel duale gravitazionale, i gradi di libertà di flavor sono descritti da brane di prova immerse nel background generato dalle brane che supportano i gradi di libertà di colore. In questo contesto, sono stati proposti vari candidati di materia oscura: segnali di onde gravitazionali prodotti nei suddetti scenari potrebbero essere rivelabili da esperimenti in corso, oppure attualmente in fase di allestimento (come per esempio LISA).

Questo progetto di ricerca sarà dunque incentrato sullo studio della fenomenologia di settori di materia oscura modellati attraverso teorie QCD-like fortemente accoppiate nel limite planare.

## Strategia di ricerca

Per prima cosa, è necessario comprendere se i modelli olografici di cui sopra possano essere compatibili con gli attuali vincoli fenomenologici, come, per esempio, quelli riguardanti l'abbondanza odierna di materia oscura, il numero di gradi di libertà relativistici alla nucleosintesi primordiale e la sezione d'urto elastica di processi che coinvolgono particelle di materia oscura. Nella prima parte del progetto si considereranno settori dark modellati attraverso una teoria confinante nel limite planare e si individueranno i parametri rilevanti che definiscono il modello stesso. Nel passo successivo, si ricaveranno espressioni, possibilmente per via analitica, per le quantità sottoposte ai bound fenomenologici in funzione dei suddetti parametri, per poi restringere il dominio di questi ultimi, affinché le eccitazioni stabili del modello sotto esame rappresentino un buon candidato di materia oscura. Una volta individuata la regione dello spazio dei parametri rilevante per la fenomenologia, si esplorerà più accuratamente lo spettro delle onde gravitazionali, anche alla luce di formule più recenti per il calcolo della velocità di espansione delle bolle nucleate alla transizione di fase [7].

In aggiunta, ci si propone di vagliare la possibilità per cui, durante l'evoluzione dell'universo, i settori dark siano caratterizzati da una fase di *cannibalismo* [8]. Questo regime è presente in ogni scenario per cui il settore dark è cinematicamente disaccoppiato da quello visibile, presenta un mass gap e l'equilibrio chimico è sostenuto da auto-interazioni number-changing ( $3 \rightarrow 2$ , e.g.) quando la temperatura scende al di sotto della massa della particella più leggera. Reazioni di questo tipo

fanno sì che il numero complessivo di particelle di materia oscura si riduca (da qui il nome), ma allo stesso tempo producono stati più energetici incidendo così sull'andamento della temperatura del settore dark in funzione del tempo. Questo potrebbe influenzare significativamente le predizioni riguardo all'abbondanza e un'analisi più approfondita si rende necessaria.

Inoltre, in teoria di stringa è noto che la densità degli stati sia caratterizzata da un andamento esponenziale con l'energia e si ritiene che questo possa riflettersi anche in teorie QCD-like [9]. Stiamo parlando del cosiddetto andamento di Hagedorn. Si intende quindi studiare come l'inclusione di un contributo di Hagedorn allo spettro della teoria sotto esame possa essere significativa da un punto di vista cosmologico. Prima di tutto, la densità di energia di materia oscura risulterebbe essere mal definita al di sopra della temperatura di Hagedorn  $T_H$ . Dunque, un contributo del genere introdurrebbe automaticamente una temperatura limite nel modello. Questo potrebbe avere implicazioni profonde e non ancora ben comprese sulla dinamica della transizione di fase confinamento/deconfinamento. Infatti, la conseguente iniezione di entropia nel settore dark non potrebbe riscaldare quest'ultimo fino a temperature maggiori di  $T_H$ . Inoltre, sempre dal punto di vista della densità di energia di materia oscura, il termine di distribuzione esponenziale di Hagedorn entrerebbe in competizione con l'andamento esponenziale decrescente delle distribuzioni non-relativistiche di equilibrio. È quindi possibile che le particelle ultra non-relativistiche possano contribuire al budget energetico complessivo del settore dark più significativamente di quanto si pensi.

La trattazione sarà infine specializzata a modelli i cui spettri (discreti) sono stati calcolati olograficamente (e.g., si veda [10]), in maniera da eseguire calcoli più precisi.

## Conclusioni

In sintesi, gli obiettivi che ci si prefigge sono:

- Studiare la fenomenologia di settori di materia oscura modellati attraverso teorie QCD-like fortemente accoppiate nel limite planare, includendo fenomeni come il cannibalismo e usando l'olografia come strumento per analizzare esempi concreti.
- Applicare i risultati del punto precedente agli scenari proposti in [6].
- Approfondire le implicazioni cosmologiche indotte dalla presenza di un contributo di Hagedorn alla densità di energia del settore dark.

## Referenze

- [1] Planck Collaboration: *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, arXiv:1807.06209 [astro-ph.CO].
- [2] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) no.6, 061102 [arXiv:1602.03837 [gr-qc]].
- [3] C. Caprini *et al.*, “Science with the space-based interferometer eLISA. II: Gravitational waves from cosmological phase transitions,” *JCAP* **04** (2016) 001, arXiv:1512.06239 [astro-ph.CO].
- [4] L. Forestell, D. E. Morrissey, K. Sigurdson, “Non-Abelian Dark Forces and the Relic Densities of Dark Glueballs,” *Phys. Rev. D* **95**, 015032 (2017), arXiv:1605.08048 [hep-ph].
- [5] F. Bigazzi, A. Caddeo, A. L. Cotrone and A. Paredes, “Fate of false vacua in holographic first-order phase transitions,” *JHEP* **12**, 200 (2020) [arXiv:2008.02579 [hep-th]].
- [6] F. Bigazzi, A. Caddeo, A. L. Cotrone and A. Paredes, “Dark Holograms and Gravitational Waves,” *JHEP* **04**, 094 (2021) [arXiv:2011.08757 [hep-ph]].
- [7] F. Bigazzi, A. Caddeo, T. Canneti, A. L. Cotrone, “Bubble Wall Velocity at Strong Coupling,” [arXiv:2104.12817 [hep-ph]].
- [8] E. Carlson, M. Machacek, L. Hall, “Self-Interacting Dark Matter.” Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL Report #: LBL-32016 (1992). Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/42f355vb>.
- [9] B. Bringoltz, M. Teper, “In search of a Hagedorn transition in SU(N) lattice gauge theories at large-N,” *Phys. Rev. D* **73** (2006) 014517, arXiv:hep-lat/0508021.
- [10] R. C. Brower, S. D. Mathur, C. Tan, “Glueball Spectrum for QCD from AdS Supergravity Duality,” *Nucl. Phys. B* **587**: 249-276 (2000), arXiv:0003115 [hep-th].