

Plan de trabajo para tesis de licenciatura

Agosto 2025

Materia: Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas (FCEyN – UBA)

Alumno: Tomás Ciccarella

Director: Dr. Nahuel Mirón Granese

Co-director: Dr. Esteban Calzetta

Producción de ondas gravitatorias durante el Recalentamiento: análisis teórico y simulaciones con CosmoLattice

En la actualidad, las ondas gravitatorias (GW por sus siglas en inglés) constituyen una herramienta fundamental para explorar el universo [1, 2, 3], ya sea en forma de señales coherentes provenientes de eventos astrofísicos puntuales [4], como las generadas por sistemas binarios de agujeros negros u otros cuerpos celestes compactos, o como fondos estocásticos de origen incoherente [5]. En el contexto cosmológico, las GW abren una ventana única para investigar fenómenos físicos ocurridos a escalas de energía extremadamente altas y en épocas muy tempranas, inaccesibles por otros medios observacionales [6, 7].

En particular, la producción de fondos estocásticos cosmológicos de GW puede originarse a partir de diversas fuentes, como fluctuaciones cuánticas del vacío durante la inflación, procesos de amplificación paramétrica de campos durante el Recalentamiento, transiciones de fase de primer orden y defectos topológicos cósmicos, entre otros [6, 7]. Estas ondas gravitatorias cosmológicas, al propagarse prácticamente sin interacción desde su generación, conservan información directa sobre las condiciones físicas del universo temprano [1].

Una etapa especialmente relevante en este contexto es el Recalentamiento, que ocurre inmediatamente después de Inflación [8, 9]. Durante este proceso, la energía del inflatón debe transferirse eficientemente a los grados de libertad del modelo estándar (y potencialmente más allá), alcanzando eventualmente un estado térmico dominado por radiación. Sin embargo, el Recalentamiento constituye aún hoy un problema abierto en cosmología [10, 11, 12]: las herramientas actuales no permiten una caracterización integral y detallada de toda la transición hacia el universo caliente y termalizado del Big Bang estándar.

Las simulaciones numéricas en redes (lattice simulations) han demostrado ser particularmente útiles para abordar esta etapa. Aunque todavía no logran describir por completo los últimos momentos del proceso en especial los vinculados a la termalización final y la equilibración química [13], representan una herramienta potente con gran potencial para incorporar progresivamente los efectos faltantes de manera efectiva. Entre los códigos más utilizados para estos fines se encuentra CosmoLattice [14], una herramienta versátil para simular la dinámica de campos interactuantes en un universo en expansión [15, 16, 17]. Este código no sólo permite implementar nuevos modelos de campos de forma sencilla, sino que también incluye módulos dedicados al cálculo del espectro de

ondas gravitatorias, y cuenta con un activo soporte técnico y desarrollo continuo. Por estas razones, será la herramienta principal de simulación numérica utilizada en esta tesis.

Una de las formas más prometedoras para estudiar el Recalentamiento es a través de las huellas que este proceso deja en el espectro de ondas gravitatorias observables hoy en día [18, 19]. Las GW generadas durante Recalentamiento presentan un espectro característico, con frecuencias determinadas por la escala de energía del proceso, el tamaño del horizonte en ese momento y las bandas de resonancia por amplificación paramétrica de los campos involucrados. A diferencia de las fluctuaciones de los propios campos, cuyo espectro se ve fuertemente homogeneizado por efectos no lineales como la backreaction y la termalización, el espectro de GW sobrevive a estos efectos, ya que las GW se desacoplan rápidamente del plasma y se propagan libremente desde su origen.

Este carácter preservado del espectro de GW convierte a estas señales en una de las reliquias observacionales más prometedoras para obtener información sobre el Recalentamiento [18, 19], cuyo resultado observable final debe necesariamente ser un universo caliente indistinguible de otras posibles historias previas [20]. En los últimos años, las simulaciones numéricas han permitido avances significativos en la caracterización de la producción de GW durante el Recalentamiento y estudios recientes [21, 22, 23] sugieren que los fondos estocásticos generados durante esta etapa podrían alcanzar frecuencias y amplitudes accesibles a experimentos en desarrollo como LISA, Einstein Telescope, redes de pulsar timing arrays o cavidades resonantes, lo cual refuerza la relevancia de su estudio.

En este contexto, el presente proyecto propone una caracterización teórico-computacional del espectro de GW generado durante el Recalentamiento, utilizando simulaciones en redes implementadas con el código CosmoLattice. Se explorarán modelos de campos escalares autoacoplados y/o acoplados a otros campos, con el objetivo de cuantificar el fondo estocástico resultante y caracterizar su forma espectral y dependencia con los parámetros del modelo [24]. La interacción materia - ondas gravitatorias durante el universo temprano, particularmente en la era de radiación ha sido estudiada previamente por el grupo en [25, 26] lo cual servirá como guía para el análisis durante el período de recalentamiento.

Objetivos específicos

1. Realizar una revisión de la bibliografía actualizada sobre producción de GW cosmológicas en el universo temprano, clasificando mecanismos relevantes y escalas características. Focalizar en la producción durante Recalentamiento debida a las inhomogeneidades dadas por decaimiento del inflatón y la excitación de los campos de materia.
2. Formular modelos simples de Recalentamiento basados en campos escalares con potenciales polinomiales y acoplamientos a otros campos escalares y de gauge.
3. Elaborar un código propio que resuelva la dinámica de las perturbaciones a orden lineal, particularmente la amplificación paramétrica de los modos resonantes, y luego la producción de GW dada por las inhomogeneidades producidas.

4. Implementar dichos modelos en CosmoLattice y correr simulaciones en 3+1 dimensiones que incluyan:
 - Evolución de campos escalares no homogéneos.
 - Backreaction y desarrollo de turbulencia.
 - Cálculo del espectro de GW.
5. Comparar los espectros obtenidos con predicciones analíticas y semi-analíticas.
6. Evaluar la detectabilidad de las señales simuladas por experimentos presentes o futuros.

Factibilidad

El estudiante ha completado las materias Relatividad General, Teoría Cuántica de Campos e Introducción a la Cosmología, lo cual le brinda las herramientas necesarias para abordar tanto los aspectos teóricos como computacionales del proyecto. El código CosmoLattice está disponible públicamente y ha sido ampliamente validado en la literatura.

El trabajo se inserta dentro de la línea de investigación del director, y se cuenta con acceso a recursos de cómputo con el servidor DIRAC [27] del departamento aunque para el análisis planteado basta con una computadora personal de escritorio.

Referencias

- [1] M. Maggiore. Gravitational Waves: Astrophysics and Cosmology (Vol. 2). Oxford University Press, 2018.
- [2] L. Bethke, Exploring the Early Universe with Gravitational Waves. Springer 2015.
- [3] M. Giovannini, Gravitational wave astronomy and the expansion history of the Universe, Int. J. Mod. Phys. A 40 (2025) 15, 2530003
- [4] The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)
- [5] G. Agazie, et al. "The NANOGrav 15 yr data set: Evidence for a gravitational-wave background." The Astrophysical Journal Letters 951.1 (2023)
- [6] C. Caprini, D. G. Figueroa. "Cosmological backgrounds of gravitational waves." Classical and Quantum Gravity 35.16 (2018): 163001
- [7] L. Bian et al, "Gravitational wave cosmology", arXiv:2505.19747
- [8] S. Weinberg, Cosmology, Oxford university press, 2008.
- [9] S. Dodelson, F. Schmidt. Modern Cosmology, Academic Press, Second Edition, 2021.
- [10] L. Kofman, A. Linde, A. Starobinsky. "Towards the theory of reheating after inflation." Physical Review D 56.6 (1997): 3258.
- [11] K. D. Lozanov. "Lectures on reheating after inflation." arXiv:1907.04402 (2019).
- [12] S. S. Mishra, "Cosmic Inflation: Background dynamics, Quantum fluctuations and Reheating" arXiv:2403.10606 (2024).
- [13] R. Micha, I. Tkachev. "Turbulent thermalization." Physical Review D 70 (2004) 043538.
- [14] <https://www.cosmolattice.net>

- [15] D. G. Figueroa et al, The art of simulating the early universe. Part I. Integration techniques and canonical cases, JCAP04(2021)035
- [16] D. G. Figueroa et al, CosmoLattice: A modern code for lattice simulations of scalar and gauge field dynamics in an expanding universe, Comp. Phys. Comm. 283 (2023) 108586
- [17] D. G. Figueroa, A. Florio, F. Torrenti. "Present and future of CosmoLattice". Rep. Prog. Phys. 87 (2024) 094901
- [18] B. Barman, S. Cléry, R. Co, Y Mambrini, K. Olive. "Gravity as a portal to reheating, leptogenesis and dark matter." Journal of High Energy Physics 2022.12 (2022): 1-42.
- [19] K. Bahari, S. Heydari and K. Karami, Reheating and relic gravitational waves as remedies for degeneracies of non-canonical natural inflation, arXiv:2506.12392.
- [20] J. Martin, C. Ringeval, V. Vennin. "Observing inflationary reheating." Physical review letters 114.8 (2015): 081303.
- [21] A. Renzi, B Goncharov, AC Jenkins, PM Meyers. "Stochastic gravitational-wave backgrounds: Current detection efforts and future prospects." Galaxies 10.1 (2022): 34.
- [22] N. Bartolo, et al. "Probing anisotropies of the stochastic gravitational wave background with LISA." Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2022.11 (2022): 009.
- [23] G. Choi, W. Ke and K. A. Olive, Minimal Production of Prompt Gravitational Waves during Reheating, arXiv:2402.04310
- [24] D. G. Figueroa and F. Torrenti, Gravitational wave production from preheating: parameter dependence, JCAP 1710, 057 (2017)
- [25] N. Mirón-Granese, JCAP06(2021)008
- [26] N. Mirón-Granese, E. Calzetta, Phys. Rev. D 97, 023517 (2018)
- [27] Web del cluster Dirac: <https://dirac.df.uba.ar/>