

Estudios de modelos cosmológicos alternativos con redes neuronales artificiales

1. Motivación del tema del trabajo

La expansión acelerada del Universo actual es uno de los problemas más intrigantes de la cosmología moderna, debido a que no hay consenso actualmente en la comunidad científica acerca del mecanismo físico responsable de la misma. Si bien el modelo cosmológico estándar puede explicar este fenómeno, dicha propuesta presenta algunos problemas que no han sido resueltos. Por estos motivos, se ha vuelto relevante el estudio de modelos cosmológicos alternativos al modelo cosmológico estándar y su contrastación con datos observacionales recientes. Para resolver los problemas mencionados anteriormente del modelo cosmológico estándar, se han considerado un conjunto de modelos cosmológicos alternativos. En este plan de trabajo nos focalizaremos en modelos cosmológicos que se construyen a partir de asumir una teoría alternativa de gravitación a la Relatividad General. Para cuantificar el efecto que cada modificación al Modelo Cosmológico Estándar tendrá en cantidades observables se requiere resolver un sistema de ecuaciones diferenciales complejo e inestable. Usualmente, este tipo de sistemas se puede resolver usando métodos numéricos. Sin embargo, estos suelen ser computacionalmente muy demandantes.

En los últimos años, el desarrollo de métodos basados en el aprendizaje automático como nuevas herramientas para analizar datos y modelos físicos se ha incrementado sustancialmente. Recientemente se han desarrollado métodos que usan redes neuronales para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales mediante aprendizaje no-supervisado (es decir, donde no se utilizan las soluciones numéricas en el entrenamiento de las NN). Al contrario de lo que ocurre con las soluciones obtenidas con el método numérico, las soluciones proporcionadas por las NNs son continuas, completamente diferenciables, requieren menor capacidad computacional que los métodos clásicos [1] y se pueden almacenar en espacios de memoria pequeños. Una extensión del método no-supervisado para resolver ecuaciones diferenciales con NNs fue propuesta en [2], la cual introduce la posibilidad de entrenar NNs que representen un conjunto (o bundle en inglés) de soluciones correspondientes a un rango continuo para los valores de los parámetros del sistema diferencial, que puede incluir condiciones iniciales y de contorno. La gran ventaja de este método, es que, una vez realizado el entrenamiento de las redes neuronales, la solución se puede usar indefinidamente sin necesidad de realizar el proceso de integración nuevamente, como es el caso de los métodos numéricos. Esto resulta en una reducción de los tiempos computacionales en los procesos de inferencia con cadenas de Markov. El método propuesto se encuentra implementado en la librería `neurodiffq` [3] que es desarrollada por el grupo del Prof. Pavlos Protopapas, quien actuará como co-director de la tesis.

2. Conformación del grupo de trabajo y antecedentes del mismo en el tema

El grupo de trabajo comprende investigadores de las dos áreas: Cosmología Dra Susana Landau (Departamento de Física, UBA), Claudia Scóccola (FCAGLP-UNLP) y Machine Learning: Pavlos Protopapas (School of Engineering and Applied Sciences, Harvard).

Este grupo de trabajo, en el cual participan investigadores de diversas áreas e instituciones se conformó recientemente, logrando en corto tiempo grandes avances en las aplicaciones del método al contexto

cosmológico. Varios alumnos de la lic. en Física participaron en dichos desarrollos:

1) Se aplicó el método de NN para resolver las ecuaciones de la dinámica de fondo del Universo en 4 modelos cosmológicos diferentes [4]. Los resultados mostraron que los tiempos computacionales de la inferencia de parámetros se optimizan de manera significativa. (Tesis de licenciatura de Augusto Chantada)

2) Se optimizó la aplicación del método descrita en 1). La clave en la mejora de los tiempos computacionales reside en el cálculo de una integral mediante el mismo método NN bundle. [5]

3) Se aplicó el método de NN para resolver la ecuación de las perturbaciones de la materia. (Tesis de Licenciatura de Luca Gomez Bachar)

2.1. Metodología de trabajo

El grupo de trabajo completo se reúne de manera remota una vez por semana (el idioma de esa reunión es el inglés). A su vez, los integrantes argentinos del grupo tienen otra reunión semanal y el estudiante tendrá una reunión semanal presencial con su directora de tesis.

3. Plan de Trabajo

El objetivo del plan de trabajo de tesis es calcular las incertezas de las soluciones obtenidas con el método bundle de redes neuronales. Uno de los grandes defectos que posee en la actualidad el método bundle de redes neuronales aplicado a la cosmología es que no es capaz de estimar la incerteza del mismo método. Para ello, hasta el momento, se comparan las soluciones obtenidas con el método con las respectivas de un método numérico. La propuesta del presente plan de trabajo es focalizarse en la ecuación de perturbaciones de la materia, que puede escribirse como un sistema simple de dos ODES. Este problema ya fue estudiado por el grupo de investigación en la tesis de Luca Gomez Bachar. La propuesta consiste en ir un paso más allá y calcular las incertezas de las soluciones obtenidas previamente. Para ello, nos basaremos en estimaciones similares desarrolladas para otros contextos por el grupo del Prof. Protopapas [6].

4. Factibilidad

Para desarrollar el plan de trabajo se dispone de un subsidio otorgado por el CONICET (PIP 11220200100729CO). A su vez, a través de la colaboración con el Prof. Pavlos Protopapas tenemos acceso a un cluster de computadoras del Institute for Applied Computational Science (IACS) de la Universidad de Harvard.

Referencias

[1] Lagaris I E, Likas A and Fotiadis D I 1998 *IEEE Transactions on Neural Networks* **9** 987–1000

[2] Flamant C, Protopapas P and Sondak D 2020 *arXiv e-prints* arXiv:2006.14372

[3] Chen F, Sondak D, Protopapas P, Mattheakis M, Liu S, Agarwal D and Di Giovanni M 2020 *Journal of Open Source Software* **5** 1931

- [4] Chantada A T, Landau S J, Protopapas P, Scóccola C G and Garraffo C 2023 *Phys. Rev. D* **107**(6) 063523
URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.107.063523>
- [5] Chantada A T, Landau S J, Protopapas P, Scóccola C G and Garraffo C 2023 *arXiv e-prints* arXiv:2311.15955 (*Preprint* 2311.15955)
- [6] Liu S, Huang X and Protopapas P 2023 *arXiv e-prints* arXiv:2306.03786 (*Preprint* 2306.03786)