

---

## **PROJETO DE PESQUISA**

### Programa de Iniciação Científica e Tecnológica – CBPF

---

Nome do Orientador e Coordenação (Pesquisador/Tecnologista/Pós-doc):  
Guilherme Brando de Oliveira

---

Nome do pesquisador ou tecnologista e Instituição de Pesquisa Externa: (Coorientador ou Colaborador externo, se houver):

---

Nome do Supervisor e Coordenação: (Pesquisador/Tecnologista):  
Guilherme Brando de Oliveira - COSMO

---

Título do Projeto:  
Formação de Estrutura em Teorias de Gravitação Modificada utilizando Teoria Lagrangeana Perturbativa

---

Palavra-chave:  
Cosmologia

---

Área de conhecimento:  
Física

---

Pré-requisitos desejáveis (se houver):  
Introdução à Cosmologia, noções básicas de programação

---

Pré-requisitos obrigatórios (se houver):  
Relatividade Geral

---

Possibilidade de orientação remota:

Sim       Não

Rio de Janeiro, 05 de Maio de 2025

**PROJETO:**  
**(Máximo de 3 páginas)**

**Título:**

Formação de Estrutura em Teorias de Gravitação Modificada utilizando Teoria Lagrangeana Perturbativa

**Resumo:**

Este projeto oferece a oportunidade de estudar **modelos alternativos ao modelo padrão  $\Lambda$ CDM**, focando em teorias de **gravitação modificada** como explicações para a energia escura e a aceleração da expansão do Universo.

O(A) aluno(a) irá aprender e aplicar **métodos numéricos avançados** para resolver **sistemas de equações diferenciais acopladas**, utilizando ferramentas computacionais modernas em um contexto de fronteira da pesquisa em Cosmologia. O projeto também envolve o estudo da **formação de estruturas cósmicas** e a comparação com dados observacionais de grandes levantamentos como o DESI.

**Introdução:**

Nas últimas décadas, a Cosmologia se solidificou como uma ciência com grande vastidão de dados observacionais. Desde a primeira comprovação de que o Universo se expande de maneira acelerada, em 1999, estudar a natureza microfísica da energia escura se tornou objeto central nos grandes levantamentos de galáxias da década passada e da atual. Dentro do Modelo Padrão da Cosmologia ( $\Lambda$ CDM), a interação gravitacional é descrita pela Teoria da Relatividade Geral, na qual se adiciona um simples termo constante às equações de Einstein, possibilitando um Universo com expansão acelerada em épocas tardias.

Essa descrição mínima da energia escura, como um fluido exótico cuja pressão é negativa e equivalente em módulo à sua densidade, permitiu a criação de um modelo de concordância, o  $\Lambda$ CDM, capaz de descrever de maneira simples um vasto conjunto de observações. Entretanto, questões fundamentais sobre a natureza intrínseca da energia escura, bem como problemas teóricos como o “problema da constante cosmológica”, sempre instigaram a busca, dentro da comunidade científica, por modelos capazes de explicar a existência desse fluido altamente não convencional a partir de primeiros princípios.

Além desses problemas conceituais, recentemente a colaboração do Instrumento Espectroscópico de Energia Escura (do inglês *Dark Energy Spectroscopic Instrument* – DESI) tornou públicos seus dois primeiros lançamentos de dados, acompanhados dos vínculos sobre os parâmetros cosmológicos. Tais vínculos mostraram uma preferência superior a 3 desvios padrão (combinando dados de galáxias e da radiação cósmica de

fundo) por um Universo no qual a energia escura apresenta uma natureza dinâmica. Esta descoberta coloca, pela primeira vez, em xeque a natureza fundamental da constante cosmológica, para a qual a densidade de energia escura seria constante.

Os resultados cosmológicos do levantamento de galáxias do DESI são divididos em dois tipos de sondas: geométricas e de crescimento de estruturas. Sabe-se que as galáxias não estão distribuídas aleatoriamente no céu; elas tendem a se agrupar devido ao colapso gravitacional, que aprofunda os poços de potencial gerados pela distribuição de matéria escura no Universo, favorecendo a formação de estruturas bariônicas. Além disso, ao calcularmos a função de dois pontos das galáxias observadas por um levantamento, observamos que essa função possui um pico a uma distância comóvel de aproximadamente 150 Mpc. Esta distância corresponde ao percurso máximo que as ondas acústicas no plasma primordial conseguiram percorrer até o resfriamento do Universo permitir o desacoplamento entre bárions e fótons.

A partir dessa distância preferencial, observada na distribuição de galáxias, podemos testar a geometria do Universo homogêneo e isotrópico em grandes escalas. Além disso, podemos utilizar a posição das galáxias no céu para estudar a taxa de formação de estruturas, uma vez que as galáxias são traçadores enviesados da distribuição de matéria escura. Ou seja, mesmo que a matéria escura não interaja eletromagneticamente, as galáxias podem ser usadas como indicadores da sua distribuição.

A formação de estruturas no Universo é governada pelo colapso gravitacional, impulsionado pelos poços de potencial de matéria escura. Embora este processo seja altamente não linear, em escalas apenas levemente não lineares ele pode ser descrito com boa precisão por uma expansão em teoria de perturbações. O formalismo mais utilizado e ensinado é baseado em coordenadas eulerianas, em que cada ponto é caracterizado pela densidade e pelo campo de velocidade local. Entretanto, também podemos mapear coordenadas eulerianas em termos de coordenadas lagrangeanas mais um campo de deslocamento, conectando assim a posição inicial (lagrangeana) da partícula de matéria escura com sua posição final (euleriana).

A quantidade fundamental na expansão lagrangeana é o campo de deslocamento, que é escrito como uma série de potências. Cada termo da expansão está relacionado ao crescimento de estruturas por meio do fator de crescimento da matéria escura, obtido pela solução de equações diferenciais ordinárias derivadas da equação da geodésica e da equação de Poisson — desta maneira, conectando as posições iniciais e finais ao campo gravitacional. Em Relatividade Geral, a equação de Poisson é uma equação diferencial parcial linear; entretanto, ao adicionarmos graus de liberdade extras, como ocorre em teorias de gravitação modificada, tal equação se torna não linear. Assim, o sistema de equações diferenciais se torna acoplado, e a integração numérica necessária para extrair o campo de deslocamento passa a apresentar uma dependência não trivial em escala.

Dessa forma, o objetivo deste projeto é o desenvolvimento de técnicas para a solução de equações diferenciais ordinárias acopladas e de métodos de integração numérica em teorias de gravitação modificada. Tais teorias são candidatas naturais para explicar a expansão acelerada do Universo, por meio da introdução de um campo escalar que atuaria como o campo associado à energia escura.

## Referências

- + DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints  
<https://arxiv.org/abs/2503.14738>
- + Cosmological Tests of Modified Gravity  
<https://arxiv.org/abs/1504.04623>
- + hi\_class: Horndeski in the Cosmic Linear Anisotropy Solving System  
<https://arxiv.org/abs/1605.06102>
- + Large-Scale Structure of the Universe and Cosmological Perturbation Theory  
<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0112551>
- + Cosmological N-Body simulation: Techniques, Scope and Status  
<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0112551>
- + Large-scale dark matter simulations  
<https://arxiv.org/abs/2112.05165>





