

Dates (approximatives) : 01/03/2026 - 31/07/2026

Durée : 5 mois

Niveau d'études : M2

Titre : Simuler la formation des structures cosmologiques avec K-mouflage

Résumé:

Le modèle cosmologique standard, fondé sur la Relativité Générale et une énergie noire décrite par une constante cosmologique, est aujourd'hui remis en question par plusieurs observations récentes.

Dans ce stage, nous étudierons un modèle alternatif de la gravitation, appelé K-mouflage, encore très peu exploré dans la littérature.

L'objectif sera de développer un solveur numérique pour cette théorie, de l'intégrer dans un code N-corps, puis de comparer les résultats obtenus à ceux du modèle cosmologique standard.

Sujet détaillé :

L'accélération de l'expansion de l'Univers est connue depuis 1998, mais de nouveaux résultats publiés par l'expérience DESI suggèrent qu'une nouvelle forme d'énergie, l'énergie noire dynamique, pourrait en être à l'origine.

La nature de cette énergie noire est cruciale en cosmologie, car elle constitue la composante majoritaire de l'Univers depuis plusieurs milliards d'années et laisse ainsi son empreinte dans la formation des grandes structures que nous observons aujourd'hui.

Or, cette formation des structures, à l'origine de la toile cosmique, découle d'interactions gravitationnelles. La forme de l'énergie noire peut donc également être interprétée comme une modification de la théorie de la gravitation.

Pour étudier l'impact de l'énergie noire ou d'une gravitation modifiée sur la formation des structures, nous utilisons des simulations N-corps, qui permettent d'explorer le

régime non linéaire, inatteignable par une approche purement analytique. Ces simulations numériques constituent un véritable laboratoire pour tester nos modèles, faire varier leurs paramètres et les confronter aux observations.

Ce stage propose d'étudier, de manière théorique et numérique, certains modèles d'énergie noire dynamique offrant une description compatible à la fois avec les tests de gravitation à petite échelle (Système solaire) et les mesures cosmologiques à grande échelle.

L'objectif principal sera de réaliser des simulations numériques de la dynamique non linéaire de ces modèles afin d'en extraire leurs effets sur la croissance des structures filamentaires de l'Univers.

Le stage demandera une bonne connaissance de la Relativité Générale, de la cosmologie, et du langage Python.

Il permettra d'aborder la modélisation de l'énergie noire dynamique et ses conséquences gravitationnelles.

Enfin, les simulations numériques permettront de proposer de nouveaux tests pour différencier l'énergie noire dynamique d'une constante cosmologique.

Objectifs du stage :

- Se familiariser avec des théories de la gravitation au-delà de la Relativité Générale.
- Comprendre le principe des simulations N-corps.
- Apprendre les bonnes pratiques de développement de code scientifique (Git, versionage).
- Développer un solveur de gravité pour le modèle K-mouflage et la valider sur des cas tests.
- Implémenter ce solveur dans un code N-corps existant, analyser la distribution de matière noire et comparer avec d'autres théories gravitationnelles.

Mots clés :

Cosmologie, Gravitation, Simulations N-corps, Énergie noire dynamique

Compétences :

Python, Git, Relativité Générale, Méthodes numériques

----- ENGLISH VERSION

Approximate dates: 01/03/2026 – 31/07/2026

Duration: 5 months

Level: M2

Title:

Simulating the Formation of Cosmological Structures with K-mouflage

Abstract:

The standard cosmological model, based on General Relativity and dark energy described by a cosmological constant, is now being challenged by several recent observations.

In this internship, we will study an alternative theory of gravity known as K-mouflage, which remains largely unexplored in the literature.

The objective will be to develop a numerical solver for this theory, integrate it into an N-body simulation code, and compare the resulting predictions with those of the standard cosmological model.

Detailed description:

The acceleration of the Universe's expansion has been known since 1998, but recent results from the DESI experiment suggest that a new form of energy, dynamical dark energy, could be responsible for it.

Understanding the nature of dark energy is a crucial issue in cosmology, as it has dominated the energy content of the Universe for billions of years and has left a significant imprint on the formation of the large-scale structures we observe today.

However, the formation of these structures, which leads to the cosmic web, arises from gravitational interactions.

Therefore, the nature of dark energy can also be interpreted as a modification of the theory of gravity.

To study the impact of dark energy or modified gravity on structure formation, we use N-body simulations, which make it possible to explore the non-linear regime, inaccessible through purely analytical approaches.

Such numerical simulations serve as a laboratory to test theoretical models, vary their parameters, and compare them with observations.

This internship aims to study, both theoretically and numerically, several models of dynamical dark energy that remain compatible with local gravity tests (Solar System) and large-scale cosmological measurements.

The main goal will be to perform numerical simulations of the non-linear dynamics of these models, in order to extract their effects on the growth of filamentary structures in the Universe.

The internship will require a solid understanding of General Relativity, cosmology, and Python programming.

It will provide the opportunity to explore the modeling of dynamical dark energy and its gravitational consequences.

Finally, the numerical simulations will be used to propose new observational tests to distinguish dynamical dark energy from a simple cosmological constant.

Objectives:

- Become familiar with theories of gravity beyond General Relativity.
- Understand the principles of N-body simulations.
- Learn best practices in scientific code development (Git, version control).
- Develop a gravity solver for the K-mouflage model and validate it on test cases.
- Implement this solver into an existing N-body code, analyze the resulting dark matter distribution, and compare with alternative gravity models.

Keywords:

Cosmology, Gravity, N-body simulations, Dynamical dark energy

Required skills:

Python, Git, General Relativity, Numerical methods