

PROPOSITION DE STAGES/THÈSES

Proposition stage M2/thèse 2025

Titre : CONTRAINDRE OU OBSERVER LA STRUCTURATION DE LA MATIÈRE NOIRE AUX PETITES ÉCHELLES PAR ASTROMÉTRIE OU PAR BRUITAGE D'UN RÉSEAU DE PULSARS

Encadrants : Julien Larena (HDR) et Julien Lavalle (HDR)

Démarrage : printemps 2025 (stage de M2) et 1er Oct. 2025 (thèse)

Sujet :

Identifier la nature et l'origine de la matière noire cosmologique est l'un des grands défis de la physique fondamentale aujourd'hui. Cette dernière pourrait être composée de particules exotiques non décrites par le modèle standard des particules élémentaires (axions ou scalaires, WIMPs, etc.), ou encore de trous noirs primordiaux selon les caractéristiques des perturbations de densité primordiales générées durant la période d'inflation cosmique (acceptation moderne du big bang ou de sa phase très précoce). Cependant, ces différents scénarios se traduisent généralement par des propriétés de structuration de la matière noire aux petites échelles très différentes, ce qui pourrait permettre soit de les conforter (voire de les identifier finement), soit de les exclure. Les caractéristiques des plus petites structures de matière noire, galaxies miniatures dépourvues d'étoiles et de gaz (baryons) et ayant des masses comprises entre celle d'un astéroïde et celle d'une galaxie naine selon les configurations (soit $\sim 10^{-12}$ à 10^7 masses solaires), dépendent à la fois de la nature de la matière noire et du spectre des fluctuations primordiales dicté par l'inflation. Ces structures auto-gravitantes de matière noire sont plus ou moins compactes selon les modèles, et n'émettent aucune lumière car pas assez massives pour piéger les baryons et former des étoiles. Ces corps massifs peuplant théoriquement les galaxies plus grandes, comme la nôtre, pourraient toutefois être à l'origine de perturbations dans les positions et vitesses des astres galactiques (étoiles, planètes, ..., pulsars), et donc d'événements de microlentilles gravitationnelles lors de transits entre les astres d'arrière-plan et l'observateur. Les moyens modernes que représentent l'astrométrie de précision (le satellite Gaia par exemple) et la mesure à très haute précision du « temps céleste » via des réseaux de pulsars (ePTA, Nanograv, etc.) ouvrent une fenêtre inédite sur la recherche de ces structures de matière noire aux petites échelles. Ce stage, ayant vocation à se poursuivre en thèse, a pour objet d'étudier la capacité de ces moyens modernes à identifier, contraindre, ou encore exclure l'existence de ces structures, et donc de nous renseigner à la fois sur la nature de la matière noire, ainsi que sur les propriétés des fluctuations primordiales aux petites échelles générées durant l'inflation. Ce sujet se positionne à l'interface de la cosmologie primordiale, de la physique des astroparticules, et de la dynamique gravitationnelle. De manière générale, il conviendra en effet de relier les scénarios de matière noire et d'inflation les plus solidement établis aux propriétés macroscopiques des structures de matière noire aux plus petites échelles, et de déterminer leurs effets individuels ou collectifs sur les observables mentionnées ci-dessus. Le stage se concentrera quant à lui sur la caractérisation des signatures astrométriques étant donnés un ou plusieurs scénarios théoriques. Il s'agit donc d'un travail théorique exploratoire, où le calcul analytique et numérique sera l'outil principal. Il conviendra d'avoir un fort appétit pour la compréhension fine, voire l'élaboration, de modèles théoriques et leur confrontation aux observations.

Pré-requis :

Formation solide en physique théorique (cosmologie, physique des particules, gravitation).
Aisance dans le calcul analytique, capacité à résoudre des équations numériquement.

Références halométrie :

[Erikcek & Law, 2011.](#)

[Van Tilburg et al., 2018.](#)

[Mishra-Sharma et al., 2020.](#)

Références réseaux de pulsars :

[Dror et al., 2019.](#)

[Ramani et al., 2020.](#)

[Lee et al., 2021.](#)

ENGLISH VERSION

Title : Structuration of dark matter on small scales : studies via astrometry or perturbations on pulsar timing arrays

Internship description : Identifying the nature and origin of cosmological dark matter is one of the great challenges of fundamental physics today. This could be made of exotic particles not described by the standard model of particle physics (axions or scalars, WIMPs, etc.), or even primordial black holes depending on the characteristics of the primordial density perturbations generated during the period of cosmic inflation. However, these different scenarios generally result in very different structuring properties of dark matter at small scales. Ultimately, these differences could be the key to differentiate between models and decide which one accurately describes dark matter. The characteristics of the smallest dark matter structures, tiny galaxies devoid of stars and gas (baryons) and having masses between that of an asteroid and that of a dwarf galaxy depending on the configuration (i.e. $\sim 10^{-12}$ to 10^7 solar masses), depend on both the nature of the dark matter and the spectrum of primordial fluctuations determined by inflation. These self-gravitating dark matter structures are more or less compact depending on the models, and do not emit any light because they are not massive enough to trap baryons and form stars. These massive bodies theoretically populating larger galaxies, such as ours, could however be the cause of disturbances in the positions and velocities of galactic bodies (e.g. stars, planets, pulsars), and therefore of gravitational microlensing events during transits between background bodies and the observer. Nowadays, precision astrometry (with the Gaia satellite for example) and the very high-precision measurement of "celestial time" via pulsar networks (ePTA, Nanograv, etc.) open a new window on the search for these dark matter structures on small scales. This internship, intended to lead to a PhD thesis, aims to study the ability of these modern observables to identify, constrain, or even exclude the existence of these structures, and thus to inform us both on the nature of dark matter, as well as on the properties of primordial fluctuations on small scales generated during inflation. This subject is positioned at the interface between primordial cosmology, astroparticle physics, and gravitational dynamics. It will involve linking the most firmly established dark matter and inflation scenarios to the macroscopic properties of dark matter structures at the smallest scales, and determining their individual or collective effects on the observables mentioned above. The internship will focus on the study of astrometric signatures given one or more theoretical scenarios. It is therefore an exploratory theoretical work, where analytical and numerical calculations will be the main tool. It will require a strong appetite for the detailed understanding, or even the development, of theoretical models and their confrontation with observations.

Prerequisites : Strong initial training in theoretical physics (cosmology, particle physics, gravitation). Appetite for analytical as well as elementary numerical methods.

References on halometry :

[Erikcek & Law, 2011.](#)

[Van Tilburg et al., 2018.](#)

[Mishra-Sharma et al., 2020.](#)

References on pulsar timing arrays :

[Dror et al., 2019.](#)

[Ramani et al., 2020.](#)

[Lee et al., 2021.](#)