

Titre: Phénoménologie de l'univers primordial en présence d'un inflaton et de trous noirs primordiaux
Mots clés: Cosmologie, Inflation, inflaton, reheating, trou noir primordial, matière noire

Résumé: L'inflation constitue aujourd'hui le paradigme de référence pour décrire l'Univers primordial, car elle résout plusieurs problèmes du modèle cosmologique. Ce cadre explique l'homogénéité et l'absence de courbure observées dans l'Univers, tout en reproduisant fidèlement les anisotropies du fond diffus cosmologique (CMB) et les grandes structures (LSS). Cependant, l'inflation doit s'achever et transférer son énergie à des degrés de liberté relativistes pour transitionner vers l'univers chaud. Cette phase, appelée réchauffement, demeure la période la moins contrainte de la cosmologie moderne, la seule borne robuste étant fournie par la nucléosynthèse primordiale (BBN), à des températures de l'ordre du MeV. Une cosmologie cohérente avant la BBN doit également expliquer plusieurs processus, notamment la production de matière noire et la génération de l'asymétrie matière-antimatière. La complexité s'accroît d'autant plus lorsque des éléments supplémentaires, tels que les cordes cosmiques, les trous noirs primordiaux (PBH) ou divers modèles de matière noire, sont pris en compte. Cette diversité de scénarios, associée aux incertitudes persistantes quant à l'inflation, complique l'élaboration d'un cadre unifié. Cette thèse examine une réalisation minimale de l'inflation, dans laquelle un unique champ scalaire supplémentaire, l'inflaton, gouverne l'inflation et le réchauffement. Après la phase de "slow roll", l'inflaton oscille de façon cohérente autour du minimum de son potentiel, formant un condensat homogène dont les couplages

permettent un réchauffement efficace. Plusieurs aspects phénoménologiques de ce scénario sont explorés. Un premier axe d'étude porte sur un inflaton léger potentiellement accessible expérimentalement. Dans le cas d'un couplage inflaton-Higgs, il est démontré qu'au-delà d'une température minimale de réchauffement, l'inflaton peut stabiliser le potentiel du Higgs tout en restant compatible avec les contraintes actuelles. L'étude est ensuite étendue à la production de matière noire, montrant que l'injection continue d'entropie pendant le réchauffement permet un découplage relativiste, normalement exclu dans le scénario standard. Le redshift accru pendant le réchauffement refroidit efficacement la matière noire, conformément aux contraintes observationnelles, et conduit à un comportement intermédiaire entre les mécanismes de *freeze-in* et de *freeze-out*. Nous considérons ensuite les effets non perturbatifs liés aux autocouplages de l'inflaton. Il est montré que la dynamique non linéaire induite entraîne un transfert rapide d'énergie vers les quanta de l'inflaton, détruisant l'homogénéité initiale du condensat et modifiant le processus de réchauffement. Enfin, le dernier chapitre se concentre sur la possibilité que les trous noirs primordiaux soient à l'origine du réchauffement. Si l'inflaton est suffisamment stable, sa dilution rapide peut conduire à une phase de domination des PBH, dont l'évaporation alimente la radiation. Ce scénario présente notamment l'intérêt de produire un spectre minimal d'ondes gravitationnelles, lequel est présenté dans ce travail.

Title: Early universe phenomenology with an *inflaton* and primordial black holes

Keywords: Cosmology, Inflation, inflaton, reheating, Primordial Black Holes, Dark Matter

Abstract: Inflation is widely recognized as the leading paradigm for describing the universe's initial state as it addresses several limitations of the standard Λ CDM cosmology. It elegantly explains the observed homogeneity and flatness of the universe, and accurately predicts the anisotropies of the Cosmic Microwave Background (CMB) and the Large-Scale Structures (LSS). However, to be consistently embedded within the cosmological evolution, inflation should end and be accompanied by a mechanism that transfers the energy to relativistic degrees of freedom. This phase, called reheating, is the least constrained period in modern cosmology, as the only robust lower bound on it is provided by Big Bang Nucleosynthesis (BBN), which occurs at temperatures on the order of an MeV. A successful cosmology before BBN should additionally feature several other processes, such as dark matter production and the generation of the matter–antimatter asymmetry, among others. The problem tightens as modifications of the cosmological or particle ingredients, such as cosmic strings, primordial black holes (PBH), or various dark matter models, will affect the evolution. This, along with the uncertainty about inflation, makes convergence toward a unified scenario rather challenging. In this thesis, we focus on a minimal inflationary realization in which a single additional scalar field, the *inflaton*, slowly rolls down its potential. This slow roll phase allow for a successful inflation to occur before reheating is achieved when the scalar field falls at the minimum of the potential, where it starts to coherently oscillate as an homogeneous condensate in a monomial potential. These oscillations, along with dedicated couplings, allow for continuous injection of entropy and source the radiation before it dominates the energy budget of the universe. We study several

phenomenological possibilities of this perturbative scenario when coupled to other physics. First, we consider a specific setup in which the *inflaton* can consistently exhibit a small bare mass within reach of experiment. We constrain this light *inflaton* scenario in the case of an *inflaton*–Higgs coupling, showing that above a minimal reheating temperature, the *inflaton* can cure the Higgs instability, maintain a consistent reheating and evade experimental bounds. We then extend our considerations to dark matter production, showing that continuous entropy injection during reheating makes relativistic dark matter decoupling viable, even though it is forbidden in standard radiation domination. The enhanced redshift induced by these models cools the dark matter in agreement with current constraints on structure formation and relativistic degrees of freedom, it interestingly features a mixed behavior between standard freeze-in and freeze-out physics. Going further, we consider the potential non-perturbative effects happening near the end of inflation. We investigate the *inflaton* self-motion (without couplings) when self-couplings are present around the minimum of the potential. We demonstrate that the resulting non-linear equation of motion induces abrupt energy transfer to the *inflaton* quanta after a finite time, thereby spoiling the initial homogeneity of the condensate and spoiling the standard perturbative picture for specific reheating channels. Finally, the last chapter is devoted to the possibility that primordial black holes serve as the main reheating channel. If the *inflaton* is sufficiently long-lived, its fast redshift can imply a period of PBH domination whose evaporation can source the radiation bath. This scenario is of particular interest because it should be accompanied by minimal gravitational-wave production, which we discuss.