

---

# Effets de la matière dense dans l'évolution des proto-étoiles à neutrons

DIRECTEUR DE THÈSE : MICAELA OERTEL

OBSERVATOIRE ASTRONOMIQUE DE STRASBOURG, 11, RUE DE L'UNIVERSITÉ, 67000 STRASBOURG

TEL : 03 68 85 20 38 ; E-MAIL : [MICAELA.OERTEL@ASTRO.UNISTRA.FR](mailto:MICAELA.OERTEL@ASTRO.UNISTRA.FR)

LES SUPERNOVAE ET HYPERNOVAE PAR EFFONDREMENT DE COEUR SE PRODUISENT À LA FIN DE la vie des étoiles massives (plus d'environ 8 masses solaires) et sont des événements spectaculaires en raison de l'immense quantité d'énergie qu'elles libèrent. Au centre, un objet compact se forme, appelé proto-étoile à neutrons (PNS). Cette PNS contient non seulement de la matière ultra-dense à des densités supérieures à celle d'un noyau atomique, mais ce sont aussi des objets chauds, atteignant des températures de l'ordre de 50 MeV. Ils se refroidissent principalement par émission de neutrinos et s'effondrent soit en un trou noir ou forment, à l'échelle de quelques minutes, une étoile à neutrons. La physique des PNS détermine entre autres la stabilité par rapport à l'effondrement en trou noir ou les propriétés dynamiques telles que les fréquences et les temps d'amortissement des modes d'oscillation et par conséquent le signal émis en ondes gravitationnelles. La modélisation de ces objets est complexe, faisant intervenir des domaines très différents : hydrodynamique, transport de neutrinos, relativité générale et une microphysique dominée par l'interaction forte en régime non-perturbatif. L'objectif de la présente thèse est d'étudier l'impact de la composition de la matière sur l'évolution de la PNS et de prédire les signaux en neutrinos et en ondes gravitationnelles sondant ainsi la structure interne de la PNS et donnant des indications sur les propriétés fondamentales de la matière ultra-dense et chaude.

Dans un premier temps, le code d'évolution des PNS développé dans notre groupe [1] sera étendu pour y inclure la possibilité de la présence de muons chargés. On sait que ces derniers sont présents dans le coeur d'une étoile à neutrons mature alors qu'ils ont des abondances négligeables dans le progéniteur de supernova. Plusieurs travaux ont montré leur impact sur l'effondrement du cœur lui-même ou dans le remanent d'une fusion d'étoiles à neutrons, cf par exemple [2,3]. Le but de ce travail est d'étudier l'impact sur l'évolution ultérieure de la PNS. Pour aller plus loin, il sera possible d'inclure d'autres particules, telles que les pions, les hyperons, voire des candidats à la matière noire tels que les axions, ou d'améliorer l'hydrodynamique dans le code d'évolution, par exemple en considérant un traitement effectif de la turbulence.

[1] A. Pascal et al, [Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 511 \(2022\) 356](#)

[2] Bollig et al [Phys. Rev. Lett. 199 \(2017\) 242702](#)

[3] Gieg et al <https://arxiv.org/pdf/2409.04420>

Au cours du travail de thèse, des codes numériques existants devront être adaptés et étendus. Un travail analytique accompagnateur sera nécessaire, en particulier pour les équations couplant transport et hydrodynamique et celles concernant la turbulence. Le groupe à l'Observatoire astronomique de Strasbourg est membre des collaborations Virgo et Einstein Telescope et le doctorant/la doctorante aura la possibilité de les rejoindre. Par ailleurs, des liens étroits existent avec des experts en physique nucléaire (Caen et Bucarest) ainsi qu'en transport de neutrinos (Francfort) et en relativité numérique (Meudon) qui pourront être mise à profit pour le travail de thèse.