

Type de projet : CDD doctorant

Francesca Gulminelli (LPC Caen)  
Jérôme Margueron (IPN Orsay)

## **Description statistique unifiée de l'équation d'état et des réactions nucléaires pour les supernovae**

### **Contexte**

Dans la phase finale de leur évolution, les étoiles massives ayant entièrement consommé leur combustible thermonucléaire, donnent lieu à l'un des phénomènes les plus spectaculaires visibles dans le cosmos : l'explosion d'une supernova. A l'issue de ce processus, une partie de la matière de l'étoile d'origine reste sous la forme d'un résidu chaud et compact, se déleptonisant progressivement par le processus de conversion électronique, et se refroidissant par émission de neutrinos, pour donner finalement naissance à une étoile à neutrons.

Au cours des différentes étapes de cette évolution, la matière de ce résidu explore un vaste domaine de conditions thermodynamiques en termes de température, densité baryonique et asymétrie d'isospin, dans lequel on s'attend à observer l'apparition de plusieurs transitions de phase qui peuvent avoir une influence sur l'hydrodynamique. L'intérêt de ces phénomènes réside dans le fait que des inhomogénéités sur large échelle modifieraient les propriétés mécaniques et thermiques de l'étoile, ainsi que sa capacité d'absorption de neutrinos, avec des conséquences importantes sur la dynamique de l'explosion et du refroidissement. Les modélisations les plus sophistiquées de la dynamique de supernova utilisent encore à l'heure actuelle des paramétrisations anciennes et simplistes pour la composition de la matière d'étoile et son équation d'état, ce qui est sans doute l'une des causes du succès mitigé de ces modélisations à décrire correctement la dynamique de l'explosion ainsi que les propriétés mesurées des étoiles à neutrons.

### **Objectifs**

Le but de ce projet doctoral est de fournir une image unifiée de la structure microscopique des proto-étoiles et de son évolution macroscopique. Pour cela nous mettrons à profit la compétence de l'équipe du LPC sur les modélisations thermo-statistiques en physique nucléaire, et l'expertise de l'équipe de l'IPN sur le traitement de la superfluidité et la phénoménologie des étoiles à neutrons.

Le responsable LPC de ce projet a tout récemment, en collaboration avec Adriana Raduta (IFIN Bucarest), élaboré un modèle statistique original permettant de calculer la composition de la matière d'étoiles compactes à température finie, à densités inférieures à la densité de saturation et en présence d'électrons, photons et neutrinos<sup>(1)</sup> par le biais d'une évaluation quasi-analytique de la fonction de partition canonique. Il s'agit du tout premier modèle dans la littérature qui traite de façon thermodynamiquement consistante les propriétés de la matière d'étoile dans un domaine de température qui varie entre 2 et 30 MeV et de densité entre  $10^{10}$  et  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>, sans introduire aucune interpolation artificielle entre le régime dominé par la matière homogène et le régime caractérisé par un ensemble statistique de noyaux de différentes masses à l'équilibre avec des neutrons, des protons et des électrons libres. Les fonctionnelles énergétiques que nous utilisons actuellement sont schématiques, et il s'agit maintenant de complexifier la description de la phénoménologie de

la matière d'étoile afin d'arriver à une utilisation sur large échelle dans les codes d'évolution de supernova à effondrement de cœur.

Voici des différentes directions d'avancement qui pourront être traitées dans ce projet de thèse :

- Introduire des tables de masse et de densités de niveaux réalistes afin d'étendre l'applicabilité du modèle aux faibles températures, de quelques centaines de keV à ~2 MeV, ce qui permettra d'étudier les effets de la structure en couches et d'appariement
- Introduire les corrections de milieu à la fonctionnelle d'énergie à l'aide de calculs HFB self-consistants, et étudier l'influence du choix de l'interaction effective
- Etendre l'applicabilité du modèle aux densités supérieures à la densité de saturation, en introduisant les degrés de liberté d'hypérons
- Introduire les degrés de liberté de déformation afin de décrire correctement les phases pasta aux alentours de la densité normale
- Aller au-delà de l'approximation de Wigner-Seitz dans le traitement de l'interaction coulombienne, avec des effets très intéressants du point de vue de la mécanique statistique à cause de l'apparition de forces à longue portée dans l'équilibre de la matière
- Evaluer les probabilités d'interaction des neutrinos avec la matière dans les différentes conditions thermodynamiques

A la fin des trois années concernées par ce projet doctoral nous estimons pouvoir arriver à une modélisation complète et réaliste d'explosion de supernova qui prend en compte tous les ingrédients essentiels de microphysique de façon thermodynamiquement consistante, pourra être directement comparée aux observations et constituera un outil numérique qui sera le premier code Français d'effondrement gravitationnel.

**(1) A.Raduta, F.Gulminelli, Physical Review C 82 065801(2010); F.Gulminelli, A.Raduta, submitted to Phys.Rev.C.**

### ***Cadre du projet***

L'équipe de l'IPN et du LPC collaborent déjà sur le projet d'astrophysique nucléaire ANR NExEN (2007-2011), qui vise à établir le rôle des instabilités aux densités sub-nucléaires et leur influence sur l'interaction des neutrinos avec la matière. L'intérêt grandissant de cette problématique est démontré par l'acceptation récente du projet ANR SN2NS (2011-2014) entre l'IPN, le LUTH et la DSM/IRFU/Sap, autour de la modélisation de la dynamique de supernova et de la structure des étoiles à neutrons. Le projet postdoctoral de l'un des postdocs junior associé à l'ANR SN2NS, qui a pris service à l'automne 2011, consiste à construire un protocole d'utilisation sur large échelle pour une utilisation directe de tables de données de notre modèle (1) dans les simulations de supernova élaborées par le LUTH (Meudon) et le Sap(CEA/DSM), en collaboration avec les auteurs (F.Gulminelli et A.Raduta).

La connexion entre la physique nucléaire et l'astrophysique est internationalement reconnue comme une thématique émergente. Ceci est démontré par le financement dans les années récentes du réseau européen COMPSTAR (2008-2013) <http://www.compstar-esf.org>, un projet à la frontière entre l'astronomie, l'astrophysique et la physique nucléaire qui fédère la communauté de théoriciens nucléaires et astrophysiciens autour de la physique des étoiles à neutrons. Le responsable IPN de ce projet est le responsable français de la collaboration COMPSTAR, et les deux équipes sont partie intégrante de ce réseau. Ces connexions vont permettre au projet d'aboutir efficacement dans un cadre interdisciplinaire.