

# Titre : **Formation et évolution de trous noirs non singuliers**

Directeur : Jean-Philippe Bruneton (maître de conférences–UMR 8102 / Observatoire de Paris/LUTh – Cosmologie : structures et origines)

## **A) Sujet et motivations**

Le sujet porte sur la question de l'intérieur des trous noirs. En relativité générale standard, et pourvu que la matière soit suffisamment « raisonnable » (dans un sens précis, connu sous le nom des conditions d'énergie), il est inévitable que l'effondrement gravitationnel d'un corps suffisamment massif se termine en trou noir avec formation d'une singularité « en son centre » (en tout cas cachée derrière l'horizon du trou noir). Cela est vrai en particulier en symétrie sphérique et axisymétrique, et cela est encore à l'état de conjecture hors de symétrie.

Cependant, la formation de cette singularité, lorsqu'on suit l'évolution temporelle de l'étoile en effondrement, nécessite de développer au centre de l'étoile une densité qui croît sans bornes. On atteint donc un régime de très haute énergie où la relativité générale n'est a priori plus valide, et où des effets de gravité quantique dominent probablement pour contrecarrer, stabiliser, voire faire rebondir l'étoile en implosion (le rebond se produit en deçà l'horizon). La question est bien connue et documentée en cosmologie dans le cadre des univers à rebonds, où la singularité initiale (le big bang) est remplacée par un rebond entre une phase de contraction puis d'expansion.

La question est en revanche mal étudiée pour les trous noirs et suscite un intérêt notable dans la littérature, en particulier depuis début 2014 (voir première référence). Ce qui a été fait jusqu'ici se résume essentiellement à poser des métriques phénoménologiques, statiques, puis rendues dynamiques de façon très ad hoc. L'origine théorique de ces modèles est inconnue.

La thèse se propose donc de savoir quelle théorie alternative à la relativité générale permettrait de faire rebondir une étoile en effondrement gravitationnel. Je connais particulièrement bien l'ensemble de ces théories alternatives (ma thèse plus deux post-docs sur le sujet), en particulier les théories tenseur scalaire,  $f(R)$ , Riemann carré, galiléons, vectorielles, etc. La littérature ne manque de tels modèles qui sont susceptibles de produire l'effet souhaité.

## **B) La thèse comporte un aspect théorique et numérique :**

Aspects théoriques : étude analytique pour comprendre comment contourner les théorèmes de singularité de Hawking-Penrose de la relativité générale

Aspects numériques : une fois des modèles de théories alternatives ainsi bien sélectionnés, étude :

De la solution statique de type trou noir régulier, quand elle existe

Si oui, aspect dynamique : suivre numériquement l'effondrement puis le rebond de l'étoile, contrôler l'apparition d'horizons apparents (question potentiellement non triviale)

Caractérisation du rebond en lui même de façon indépendante du système de

coordonnées (question potentiellement non triviale)

Contrôle des potentielles «divergences» du code, du fait de la violence du rebond.

Comparaison critique avec les modèles ad hoc de la littérature.

Aspect phénoménologiques : ces métriques (dont certaines sont déjà connues dans la littérature) montrent de façon intéressante que la métrique à l'extérieur du trou noir dépend de sa structure interne. Autrement dit en observant les géodésiques autour, par exemple, du trou noir central, comme le permettra la mission GRAVITY, on pourrait contraindre ce genre de modèles, même si les effets attendus sont faibles a priori.

Aspects subsidiaires : les théories qui produisent des trous noirs non singuliers sont elles aussi à même de régler le problème de la singularité initiale, et inversement? Les symétries étant différentes dans les deux problèmes, ce n'est pas évident.

La thèse commencera évidemment par le cas à symétrie sphérique, nettement plus simple. Selon l'avancement, l'extension du travail au cas en rotation sera la suite naturelle du travail.

### **C) Adéquation avec les thématiques du laboratoire**

Ce sujet est en remarquable adéquation avec les thématiques et les compétences du laboratoire d'accueil. L'équipe ROC du LUTh (Relativité et Objets Compacts) est internationalement reconnue pour son expertise en relativité numérique des objets compacts et des trous noirs. Des discussions préliminaires avec en particulier Ericourgoulhon, Jérôme Novak et Philippe Grandclément ont démontrés leurs intérêt pour ce sujet, qui amènera à des collaborations à la fois sur les aspects théoriques et numériques. L'équipe COS, quant à elle, sera intéressée par l'aspect rebond primordial en cosmologie. Enfin, des collaborations avec l'APC, dont Pierre Binétruy, qui s'intéresse également aux trous noirs non singuliers vis-à-vis de la question du paradoxe de la perte d'information et des firewalls, seraient très fructueuses.

### **D) Organisation du travail**

6 mois : étude théoriques = consolidation de la maîtrise de l'étudiant en relativité générale, en particulier : théorèmes de singularité, horizons des événements versus horizons apparents, surfaces piégées, équations de Raychauduri, diagrammes de Penrose, modèle de Tolman Oppenheimer Volkoff, solution analytique de l'effondrement d'une boule de matière sphérique et sans pression, introduction aux théories scalaires tenseurs, vectorielles, et galiléens.

6 mois : Reproduction numérique de la seule solution exacte connue (cf supra) d'effondrement. Extension à un premier modèle susceptible de rebondir (un modèle connu motivé par la Loop Quantum Gravity actuellement déjà à l'étude). Inconnue ici : stabilité du code numérique qu'il faudra soigneusement établir ; et questions du choix des systèmes de coordonnées.

6 mois : extensions à diverses théories alternatives

Restant de la thèse : extensions aux symétries axisymétriques et/ou aspects phénoménologiques.

Références utiles :

- «Planck Stars», C. Rovelli et F. Vidotto, Int. J. Mod. Phys. D23, 1442026 (2014)
- «Formation and Evaporation of Nonsingular Black Holes», S. Hayward, Phys. Rev. Lett.96, 031103

-