

Campagne 2020 Contrats Doctoraux Instituts/Initiatives

Proposition de Projet de Recherche Doctoral (PRD)

Appel à projet IPhyInf - Initiative Physique des infinis 2020

Intitulé du Projet de Recherche Doctoral :

Coalescences de binaires d'étoiles à neutrons à l'ère de l'astronomie multi-messagers : étude de populations et modélisation des contreparties électromagnétiques

Directeur de Thèse porteur du projet (titulaire d'une HDR) :

NOM : **DAIGNE**

Prénom : **Frédéric**

Titre : Professeur des Universités ou

e-mail : daigne@iap.fr

Adresse professionnelle : Institut d'Astrophysique de Paris
(site, adresse, bât., bureau) 98 bis, boulevard Arago
75014 Paris
Bureau 320

Unité de Recherche :

Intitulé : Institut d'Astrophysique de Paris

Code (ex. UMR xxxx) : UMR 7095

ED127-AstronomieAstrophysiqueIdF

Ecole Doctorale de rattachement de l'équipe & d'inscription du doctorant :

Doctorants actuellement encadrés par le directeur de thèse (préciser le nombre de doctorants, leur année de 1^{ère} inscription et la quotité d'encadrement) :

1 doctorant (Raphaël DUQUE), 1^{ère} inscription 01/10/2018, encadrement = 50% (co-encadrant: Robert Mochkovitch, IAP)

Co-encadrant :

NOM : **DVORKIN**

Prénom : **Irina**

Titre : Maître de Conférences des Universités HDR

ou

e-mail : dvorkin@iap.fr

Unité de Recherche :

Intitulé : Institut d'Astrophysique de Paris

Code (ex. UMR xxxx) : UMR 7095

ED127-AstronomieAstrophysiqueIdF

Ecole Doctorale de rattachement :

Ou si ED non Alliance SU :

Doctorants actuellement encadrés par le co-directeur de thèse (préciser le nombre de doctorants, leur année de 1^{ère} inscription et la quotité d'encadrement) : 0

Cotutelle internationale : Non Oui, précisez Pays et Université :

Description du projet de recherche doctoral (en français ou en anglais)

3 pages maximum – interligne simple – Ce texte sera diffusé en ligne

Détailler le contexte, l'objectif scientifique, la justification de l'approche scientifique ainsi que

Coalescences de binaires d'étoiles à neutrons à l'ère de l'astronomie multi-messagers : étude de populations et modélisation des contreparties électromagnétiques

Projet de recherche doctoral : Initiative Physique des Infinis, Sorbonne Université
(projet soumis avec l'accord de la direction du laboratoire)

1 Contexte et objectifs scientifiques

Contexte général. Le 17 août 2017 a eu lieu la première observation multi-messagers de la coalescence de deux étoiles à neutrons (GW170817). Les interféromètres LIGO et Virgo ont tout d'abord détecté les ondes gravitationnelles émises lors de la phase spirale précédant leur coalescence, puis les satellites Fermi et INTEGRAL ont détecté 1.7 s plus tard un sursaut gamma court, associé à l'éjection d'un jet relativiste par la nouvelle source compacte formée après la coalescence. Ensuite, ce sont plusieurs contreparties lumineuses qui ont été observées à toutes les longueurs d'onde. Elles proviennent de deux phénomènes distincts : l'émission d'une kilonova, bulle de gaz chaud immédiatement éjectée lors de la coalescence et siège de la nucléosynthèse d'éléments lourds, et la rémanence associée à la décélération du jet dans le milieu interstellaire.

Contexte instrumental. Cette observation a marqué l'avènement d'une nouvelle ère de l'astronomie dans laquelle il devient possible de suivre des événements transitoires avec les messagers complémentaires que sont la lumière et les ondes gravitationnelles, voire les neutrinos. Dans ce contexte, la 3^e période de prise de données (O3) de LIGO/Virgo s'achève en avril 2020, pendant lequel une cinquantaine de candidats correspondant à la coalescence d'objets compacts ont été identifiés, y compris une coalescence d'étoiles à neutrons déjà confirmée. En avril 2021, O4 débutera, avec des instruments toujours plus sensibles et un nombre de détections encore plus grand. En 2022 arriveront de nouveaux télescopes permettant une recherche de contreparties visibles beaucoup plus efficace, comme le LSST, et des observatoires multi-longueurs d'onde adaptés à la recherche du sursaut gamma ou de la rémanence, comme le satellite SVOM.

Grands axes de recherche. De nouveaux enjeux de modélisation sont apparus pour l'interprétation de ces observations multi-messagers : (1) comprendre quelle physique régit la formation des systèmes binaires et quelles conditions initiales permettent de donner naissance à des couples d'étoiles à neutrons, et plus généralement d'étudier cette population par type de galaxie, ainsi que l'enrichissement en éléments lourds qui lui est associée ; (2) comprendre la physique de la coalescence elle-même et des mécanismes d'éjection qui la suivent : quelle est la nature de l'objet compact final ? quelle diversité d'émission lumineuse est attendue, à la fois intrinsèquement suivant les paramètres du système binaire initial, et également en fonction de l'angle de visée, auquel l'émission des jets relativistes est particulièrement sensible. Derrière ce second aspect se cache une autre question fondamentale : comment les événements révélés par les ondes gravitationnelles et correspondant plutôt à des sources proches (~ 100 Mpc) vues de côté se connectent-ils à la population de sursauts gamma courts déjà connue, observée à grande distance (~ 1 Gpc), avec le jet vu de face ?

Initiative Physique des Infinis. La thèse se déroulera dans un contexte fortement multidisciplinaire, à l'interface entre l'astrophysique (évolution stellaire et galactique, sursauts gamma), la physique nucléaire (synthèse d'éléments lourds), la physique des ondes gravitationnelles ou encore l'instrumentation de pointe (interféromètres LIGO/Virgo, observations multi-longueurs d'onde au sol et dans l'espace). En effet, l'un des enjeux majeurs de l'étude des coalescences de binaires d'étoiles à neutrons est de comprendre et de relier des processus sur des échelles

temporelles et spatiales très différentes pour ensuite pouvoir interpréter les observations. Ainsi, le sujet s’inscrit parfaitement dans l’Initiative Physique des Infinis, qui « vise à comprendre des phénomènes dont les propriétés s’échelonnent de l’infiniment petit à l’infiniment grand », puisqu’il relie l’échelle cosmologique (galaxies) à l’échelle nucléaire (synthèse par capture rapide des neutrons) en passant par l’échelle intermédiaire de la physique stellaire.

2 Approche scientifique

Cette thèse se focalisera sur le développement des modèles qui serviront ensuite pour l’interprétation des nouvelles observations. Les travaux seront menés selon deux axes principaux :

Modèles de population. (1) Certaines étapes d’évolution des systèmes d’étoiles binaires massives (progéniteurs d’étoiles à neutrons) sont encore mal comprises, comme la phase d’enveloppe commune et l’efficacité des vents stellaires. En couplant des codes d’évolution stellaire avec des modèles semi-analytiques d’évolution des galaxies existant dans l’équipe de l’IAP, des modèles de populations des étoiles à neutrons seront construits et comparés aux populations observées en ondes gravitationnelles. Cette comparaison nécessitera aussi de prendre en compte la détectabilité de chaque binaire par les interféromètres LIGO/Virgo. Cela permettra de contraindre les modèles stellaires sous-jacents et de faire de prédictions pour les futures observations. (2) En utilisant ces modèles de population, il sera possible de modéliser l’enrichissement en éléments lourds, synthétisés par capture rapide des neutrons dans les kilonovae. Ce travail aboutira à la modélisation de la quantité d’éléments lourds produits dans différents types de galaxies. Une comparaison avec les abondances observées permettra de comprendre plus en détails la question toujours ouverte du site astrophysique de la formation des éléments les plus lourds dans l’Univers.

Modèles d’éjection et des contreparties lumineuses associées. (1) La rémanence est due au freinage de l’éjecta par le milieu extérieur. Les observations montrent une structure latérale du jet. L’émission observée est dominée par le rayonnement synchrotron d’électrons accélérés au niveau du choc avant qui se propage dans le milieu extérieur. Une autre région d’émission est possible, le choc en retour qui se propage dans le jet, et il sera intéressant d’étudier sa contribution, particulièrement sensible à la structure radiale, mal contrainte. De plus, les conditions physiques dans ces chocs sont favorables aux diffusions Compton inverse. La prédiction de l’émission à haute et très haute énergie associée sera très intéressante dans le contexte du suivi de ces phénomènes par des télescopes Cerenkov comme le futur CTA. Pour toutes ces questions, l’effet de l’angle de visée sera un paramètre clef pour comprendre la diversité attendue. (2) L’émission prompte, détectée quelques secondes après le signal gravitationnel, est précoce et donc affectée par une forte focalisation relativiste de la matière éjectée. Ainsi, le signal observé provient probablement de l’émission des régions du jet directement dirigées vers l’observateur, c’est à dire relativement éloignée du jet ultra-relativiste central dans le cas de GW170818. Le sursaut gamma associé est d’ailleurs très peu lumineux. Dans ce contexte, le mécanisme associé au sursaut gamma associé à de telles coalescences d’étoiles à neutrons vues de côté est-il nouveau ou similaire au mécanisme à l’origine des sursauts courts ? Cette question difficile est beaucoup moins explorée que la physique de la rémanence. Il sera possible de s’appuyer sur la longue expérience de l’équipe de l’IAP dans la modélisation des sursauts gamma cosmiques.

3 Encadrement et laboratoire d’accueil

La thèse se déroulera à l’IAP, au sein de l’équipe d’astrophysique des hautes énergies. Cet environnement de travail stimulant de renommée mondiale permettra d’acquérir une culture

astrophysique poussée grâce aux nombreuses interactions possibles, notamment sur les thématiques des ondes gravitationnelles et de l'étude des galaxies (observation et simulation). Outre leurs connexions aux collaborations LIGO/Virgo et SVOM, les encadrants disposent déjà d'un réseau de collaborateurs établi en France et à l'étranger sur la thématique de la thèse.

La partie **Modèles de population** sera principalement encadrée par **Irina Dvorkin**, experte dans le domaine de la modélisation des populations de sources d'ondes gravitationnelles. Elle a notamment étudié les contraintes sur les modèles stellaires apportés par les premières détections des trous noirs binaires en coalescence, ainsi que la dispersion des éléments lourds dans le milieu interstellaire. Elle apportera aussi son expertise dans le domaine d'évolution de galaxies, ce qui sera important pour étudier les galaxies hôtes des coalescences d'étoiles à neutrons. Le-la doctorant-e pourra ainsi s'appuyer sur les codes d'évolution des galaxies qu'elle a développés. Par ailleurs, Irina Dvorkin est membre de la collaboration LIGO/Virgo, dont les prochains détections seront étudiées au cours de cette thèse.

La partie **Modèles d'éjection et des contreparties lumineuses associées** sera principalement encadrée par **Frédéric Daigne**, expert dans le domaine de la modélisation des sursauts gamma : physique du moteur central et de l'éjection relativiste, dynamique et processus d'émission pendant le sursaut gamma et la rémanence, modèles de populations, etc. Il a notamment apporté des contributions importantes à l'étude de l'émission du sursaut gamma proprement dit, avec le développement du modèle des *chocs internes*, l'un des principaux mécanismes encore discutés, mais aussi plusieurs travaux sur l'*émission photosphérique*. Concernant la physique de la rémanence, il a contribué à mettre en lumière le rôle possible du *choc en retour* pour expliquer la diversité et la variabilité observées. Le-la doctorante-e pourra ainsi s'appuyer sur plusieurs codes déjà disponibles dans l'équipe, qui simulent la dynamique et l'émission des jets de sursaut gamma dans différentes phases de leur évolution. Par ailleurs, F. Daigne est membre de la collaboration SVOM, projet franco-chinois consacré à l'étude multi-longueurs d'onde du ciel transitoire à haute énergie, avec un segment spatial (γ , X et visible), devant être lancé en 2022, et un segment sol pour le suivi sur alerte dans les domaines visible-IR, déjà en cours de déploiement. SVOM pourra détecter, localiser et suivre les sursauts gamma et leurs rémanences, mais pourra également réagir aux alertes ondes gravitationnelles pour chercher des contreparties. F. Daigne est le *mission scientist* français en charge du programme principal (sursauts gamma). Les premières données de SVOM seront disponibles pendant la deuxième partie de la thèse et pourront être confrontées aux outils de modélisation développés par le-la doctorant-e.

Publications récentes des encadrants en lien avec le projet :

- Duque, Beniamini, Daigne & Mochkovitch, first revised version submitted to A& A (2020)
- Beniamini, Duque, Daigne & Mochkovitch, MNRAS, 492, 2847 (2020)
- Duque, Daigne & Mochkovitch, A&A, 631, id.A39 (2019)
- Vangioni, Goriely, Daigne, François & Belczynski, MNRAS, 455, 17 (2016)
- Dvorkin et al., MNRAS 461, 3877 (2016a)
- Dvorkin et al., Phys. Rev. D. 94, 103011 (2016b)
- Beniamini, Dvorkin & Silk, MNRAS 478, 1994 (2018)
- Dvorkin et al., MNRAS 479, 121 (2018)

4 Profil de doctorant-e recherché

Le-la doctorant-e devra disposer d'une solide formation en physique avec une spécialisation en astrophysique, être motivé-e par un projet de modélisation mettant en œuvre une physique riche et variée, montrer de la curiosité scientifique, avoir la volonté de continuer à apprendre et se former. Avoir déjà des connaissances sur certains aspects de la physique et de l'astrophysique mises en jeu dans le projet serait naturellement un avantage. De bonnes aptitudes au calcul scientifique numérique seraient un réel atout.