

Multi-messenger studies of kilonovae

PhD advisors : Sarah Antier, IJCLAB, Orsay / Marion Pillas, IAP, Paris

Time Domain Astronomy is a research field that covers explosive phenomena such as the collapse of massive stars or the collision of compact objects involving a neutron star or a black hole. These events can be detected not only through gravitational waves emitted during such processes but also, through the light emitted by the ejected matter across the full electromagnetic spectrum, which travels at very high speed. This optical light signature (400 - 800 nm) typically reaches its peak brightness within a few hours and declines rapidly to several days, but it highly depends on the type of event. Among them, kilonovae are optical radioactive signatures of heavy elements freshly synthesized in a neutron -rich environment after, for instance, a binary neutron star merger. Besides, kilonova studies observed across the electromagnetic and gravitational wave messengers allow us to test physics with very high dense matter, or to understand the enrichment of heavy elements from our galaxy and solar system.

Since the 1970s, these events have been commonly revealed by space gamma-ray detectors that capture sudden flashes of light at very high energy lasting a few seconds. These events are rare but are relatively easy to identify in the sky. Nevertheless, the understanding of physics processes at play is less obvious if we do not have access to other light messengers from optical to radio. However, detecting the same events only in the optical sky for instance, is more complex because there are numerous changes (so called “transients”) in the optical sky. While these variations may reveal new sources associated with kilonovae, they are often dominated by other astrophysical processes.

The Vera C. Rubin Observatory [1], a 8-meter telescope fully operational in Chile by late 2026, is set to revolutionize Optical Time Domain Astronomy. In 2028, the gravitational waves detectors will restart their observations, complementing the optical transient sky. Moreover, our scientific community has developed GRANDMA [2], a network of telescopes and experts dedicated to the study of kilonovae using Vera Rubin and other optical telescopes, gravitational data and gamma-ray data [3].

The PhD work is aligned with new and exciting opportunities of first observations from Vera Rubin, for kilonovae and with upcoming campaigns of LIGO-Virgo-Kagra gravitational waves events. The student will work on observational strategies following-up gravitational-waves and kilonova candidates with GRANDMA, using predictions from the recent kilonova models and information released about the source properties from LIGO-Virgo-KAGRA and Vera Rubin. Especially, one needs to take into account the sensitivity of the telescopes and GW detectors, as well the diversity of progenitors producing kilonova. The student will also be involved in kilonova characterization in a multi-messenger approach involving optical, gamma-ray and gravitational-wave data. To do this, the student will analyse the promising kilonova candidates during the Vera Rubin era and use the most-up-to-date models of astrophysical scenarios involving white dwarfs, neutron star and black hole.

[1] <https://rubinobservatory.org/>

[2] <https://grandma.ijclab.in2p3.fr/>

[3] Pang Peter et al., Nature Communications, 14 (2023), 1, 8352

Etude multi-messagers des kilonovae

Encadrants de thèse: Sarah Antier, IJCLAB, Orsay / Marion Pillas, IAP, Paris

L'astronomie du ciel transitoire étudie les phénomènes violents tels que l'effondrement d'étoiles massives ou la collision d'objets compacts impliquant une étoile à neutron ou un trou noir. Ces événements peuvent être détectés non seulement grâce aux ondes gravitationnelles émises au cours de ces processus, mais aussi grâce à la lumière émise par la matière éjectée. Les kilonovae sont l'une des signatures visibles d'éléments lourds radioactifs fraîchement synthétisés dans un environnement riche en neutrons après (par exemple) une fusion d'étoiles à neutrons. En outre, l'étude des kilonovae nous permet de tester la physique avec de la matière très dense, ou encore de comprendre l'enrichissement en éléments lourds de notre galaxie et de notre système solaire.

Depuis les années 1970, ces événements sont couramment détectés par des instruments gamma qui captent de brusques bouffées de lumière à très haute énergie durant quelques secondes. Mais ces événements sont rares et la compréhension des processus physiques en jeu est limitée si on a accès uniquement au rayonnement gamma. L'observatoire Vera C. Rubin [1], un télescope de 8 mètres opérant dans le domaine visible, est sur le point d'entrer en opération. En 2028, les détecteurs d'ondes gravitationnelles reprendront leurs observations. Enfin, notre communauté scientifique a développé GRANDMA [2], un réseau de télescopes et d'experts dédié à l'étude des kilonovae. En combinant les données des télescopes de GRANDMA, du télescope Vera Rubin et ainsi les données gravitationnelles et gamma, on pourra avoir une vue d'ensemble plus précise sur les processus physiques [3].

Les travaux de doctorat s'inscrivent dans le cadre des nouvelles opportunités passionnantes offertes par les premières observations de Vera Rubin sur les kilonovae ainsi que sur les prochaines campagnes d'observation des ondes gravitationnelles LIGO-Virgo-KAGRA. L'étudiant travaillera sur des stratégies d'observation pour associer les ondes gravitationnelles aux candidates de kilonovae avec GRANDMA et Vera Rubin, en utilisant les modèles les plus récents sur les kilonovae. Il tiendra notamment compte de la sensibilité des télescopes et des détecteurs d'ondes gravitationnelles, ainsi que de la diversité des progéniteurs produisant ces kilonovae. L'étudiant participera également à la caractérisation des kilonovae dans le cadre d'une approche multi-messagère impliquant des données optiques, gamma et gravitationnelles. Pour ce faire, l'étudiant analysera les candidats kilonovae prometteurs pendant l'ère Vera Rubin et recherchera le scénario astrophysique associé le plus convainquant. Ce dernier permettra en outre de contraindre les paramètres physiques tels que la nature des progéniteurs de l'événement, la masse de la quantité de matière éjectée mais aussi, l'équation d'état de la matière nucléaire ultra-dense [4].

[1] <https://fink-portal.org/>

[2] <https://grandma.ijclab.in2p3.fr/>

[3] <https://arxiv.org/pdf/2205.08513>

[4] Pang Peter et al, Nature Communications, 14 (2023), 1, 8352