

Subject : GRANDMA, Vera Rubin and High Energy Astrophysical transient events

PhD advisors : Patrice Hello, Sarah Antier, IJCLAB, Orsay.

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 neutron rich environment after (for instance) a binary neutron stars merger. Besides, kilonova studies allow us to test physics with very high densed 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 gamma-ray detectors can monitor the entire sky and seek for high distance phenomena, far beyond our galaxy. These events are rare because they are capable of producing high energy photons, and are relatively easy to identify in the sky. Nevertheless, the understanding of physics processes at play and the origin of the progenitors is less obvious : other light messengers from optical to radio are very useful providing complementary information.

However, detecting such explosive events in the optical sky is more complex because we detect numerous variations in light intensity (so called "transients") regarding background level, with an estimated of 10 million of such variations occurring daily across one third of the full sky in the Vera Rubin observatory. While these variations may reveal new sources associated to explosive phenomena (that we may refer to explosive transients), they are often dominated by other astrophysical processes.

The upcoming Vera C. Rubin Observatory, a 8-meter telescope fully operational in Chile by late 2025, is set to revolutionize Optical Time Domain Astronomy. Our scientific community has developed data science and observational strategies to detect and analyze the flow of data taken by Vera Rubin telescope, providing preliminary information on the origin of these multiple detections, such as alerts with the broker Fink led by IJCLAB [2]. Among them, some will be associated to explosive events not captured by gamma-ray detectors or others.

The PhD work is aligned with new and exciting opportunities of first observations from Vera Rubin, for kilonovae and explosive fast transients. On the observational side, it is aimed to enrich primary information from Vera-Rubin alerts through on-demand observations performed by an international network of telescopes, GRANDMA (coordinated at IJCLAB) [2]. It involves developing solutions to filter alerts based on our up to date physical understanding of these sources, and balanced with the practicality of observations. Artificial intelligence will play a crucial role in this first topic, that we can learn from similar experience of follow-up with GRANDMA, homogenization of data from the different telescopes and scaling up physical models fitting.

Once data are collected, the PhD research will tackle to improve our understanding of these fast transient sources found with Vera Rubin and follow-up with GRANDMA. In particularly, the PhD student will contribute to an international physics framework "Nuclear Multi-messenger Astronomy" (NMMA), that combines multi-wavelength data (and gravitational waves if any) with various models, to constrain physical parameters such as (among others) the nature of the progenitors of the event, the mass of the ejecta but also, the equation of state of nuclear matter in neutron star [3]

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

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

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

Version française :

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 neutrons 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 sur l'ensemble du spectre électromagnétique, qui se propage à très grande vitesse. Cette signature lumineuse optique atteint généralement son pic de luminosité en quelques heures et décline rapidement jusqu'à plusieurs jours, mais cela dépend fortement du type d'événement. Parmi eux, les kilonovae sont des signatures optiques 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. Ces détecteurs de rayons gamma peuvent surveiller l'ensemble du ciel et rechercher des phénomènes à grande distance, bien au-delà de notre galaxie. Ces événements sont rares car ils doivent être capables de produire des photons de haute énergie. La compréhension des processus physiques en jeu et de l'origine des progéniteurs est moins évidente : d'autres messagers lumineux, de l'optique à la radio, sont très utiles pour fournir des informations complémentaires.

Cependant, la détection de tels événements explosifs dans le ciel visible est plus complexe car nous détectons des millions de transitoires par nuit sur un tiers du ciel complet dans l'observatoire Vera Rubin. Bien que ces transitoires puissent révéler de nouvelles sources associées à des phénomènes explosifs, elles sont souvent dominées par d'autres processus astrophysiques. L'observatoire Vera C. Rubin devrait révolutionner l'astronomie visible dans le domaine temporel. Notre communauté scientifique a développé des stratégies de science des données et d'observation pour détecter et analyser le flux de données prises par le télescope Vera Rubin, fournissant des informations préliminaires sur l'origine de ces multiples détections, telles que les alertes avec le broker Fink menées par l'IJCLAB [2]. Parmi celles-ci, certaines seront associées à des événements explosifs non détectés par les détecteurs de rayons gamma ou autres. Le travail de thèse exploitera les premières observations de Vera Rubin, pour les kilonovae et les transitoires rapides. Sur le plan de l'observation, l'objectif est d'enrichir les informations primaires provenant des alertes du Vera-Rubin grâce à des observations à la volée effectuées par un réseau international de télescopes, GRANDMA (coordonné à l'IJCLAB) [2]. Il s'agit de développer des solutions pour filtrer les alertes sur la base de notre compréhension physique de ces sources, tout en tenant compte de l'aspect pratique des observations. L'intelligence artificielle jouera un rôle crucial dans ce premier sujet.

Une fois les données collectées, la thèse s'attachera à améliorer notre compréhension de ces sources transitoires découvertes avec Vera Rubin et suivies avec GRANDMA. En particulier, le doctorant contribuera au framework « Nuclear Multi-messenger Astronomy » (NMMA), qui combine des données multi-longueur d'onde (et des ondes gravitationnelles le cas échéant) avec divers modèles, pour contraindre les paramètres physiques tels que (entre autres) la nature des progéniteurs de l'événement, la masse de l'éjecta mais aussi, l'équation d'état de la matière nucléaire dans l'étoile à neutrons [3].

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

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

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