

Prediction of X-ray counterparts to supermassive black-hole mergers

Context:

Understanding the physical conditions in the vicinity of black holes is one of the major challenges of high-energy astrophysics. The question of how supermassive black holes (SMBHs) at the center of galaxies form, grow and accrete matter will largely remain open during the next decade. In the early 2030s, the launch of the next two large-class missions of the European Space Agency (ESA), ATHENA and LISA, will be a game-changer for how we study SMBHs. While LISA is designed to observe the low-frequency gravitational-wave signal emitted by merging SMBH binary systems, ATHENA will provide cutting-edge soft X-ray data of high-energy sources, in particular through the X-IFU Integral Field Unit spectrograph offering an outstanding spectral resolution of 2.5 eV. The possible observation with ATHENA of an X-ray counterpart to a (pre-)merger SMBH detected by LISA will open the door to a better understanding of the accretion processes powering Active Galactic Nuclei, their close environment, and relativistic jet formation and acceleration.

The APC laboratory, currently the only laboratory in France participating in both LISA and ATHENA, is highly involved in the design of the two space missions. In particular, APC is in charge of the development of a part of the X-IFU readout chain which directly impacts the spectral performances of the instrument. In parallel to this technical activity, we are currently participating in the implementation of an end-to-end simulator of X-IFU (in collaboration with CNES, IRAP and ECAP) which will be used to accurately simulate X-ray observations. In parallel, APC supports an intensive effort dedicated to the development of an innovative numerical tool able to produce synthetic observations from self-consistent GR-(M)HD simulations of complex relativistic astrophysical systems and in particular of accretion/ejection processes in the vicinity of compact objects.

Studying the detectable electromagnetic (X-ray) counterpart to SMBH mergers is crucial not only to distinguish such transient sources among many other transient objects in the sky but also to further interpret future observational datasets. However, predicting the electromagnetic emission that may occur in the late inspiral phase and after the merger is a complex task that requires the use of General Relativity (GR)-MHD simulations based on time-varying spacetime metrics or relevant approximations.

Thesis work:

The scope of this thesis is to address two complementary aspects at the interface between numerical simulations and X-ray observations: 1) the prediction, through numerical simulations, of the X-ray counterpart to SMBH binary mergers observed by LISA; 2) the estimate of ATHENA capability to detect this counterpart from the use of end-to-end simulations of the forthcoming X-ray observatory.

Depending on his/her own interests, the PhD candidate will have the possibility of being involved in a) the development of a pipeline to generate synthetic observations from numerical simulation outputs, b) the numerical implementation of existing alternative metrics to simulate accretion processes in the vicinity of binary black-hole systems; c) the processing of X-ray data, d) the APC contribution to the development of the end-to-end simulator of the ATHENA/X-IFU instrument.

Prédiction des contreparties en rayons X aux coalescences de trous noirs supermassifs

Contexte :

La compréhension des conditions physiques au voisinage des trous noirs constitue l'un des défis majeurs de l'astrophysique des hautes énergies. En particulier, la formation et la croissance des trous noirs supermassifs situés au centre de la plupart des galaxies est encore peu comprise et le restera probablement dans la décennie à venir. Toutefois, au début des années 2030, les deux prochaines missions de classe L (Large) de l'agence spatiale européenne, ATHENA et LISA, offriront une vision multi-messager totalement nouvelle de ces objets. Alors que LISA permettra la détection d'ondes gravitationnelles de basse fréquence associées à la coalescence des systèmes binaires de trous noirs supermassifs, ATHENA apportera des observations du ciel en rayons X d'une sensibilité inégalée. En particulier, le spectrographe intégral de champ X-IFU offrira une résolution spectrale de 2.5 eV promettant une vision beaucoup plus fine des processus d'accrétion de matière dans l'environnement proche des trous noirs. Ainsi, la possibilité d'observer avec ATHENA une contrepartie en rayons X aux coalescences de trous noirs supermassifs détectées par LISA ouvrira la porte à une compréhension inédite des processus physiques potentiellement associés à ces coalescences : origine des noyaux actifs de galaxies, formation et accélération des jets relativistes, etc.

Le laboratoire APC est actuellement le seul laboratoire français investi à la fois sur LISA et sur ATHENA. En particulier, l'APC est en charge du développement d'une partie de la chaîne de lecture de X-IFU qui a un impact direct sur ses performances spectrales. Parallèlement à cette activité instrumentale, le laboratoire participe actuellement à l'implémentation d'un simulateur « end-to-end » de X-IFU, en collaboration avec le CNES, l'IRAP et l'ECAP, afin de modéliser finement les performances de l'instrument. Enfin, l'APC consacre un effort important au développement d'outils de simulations numériques capables de produire des observations synthétiques à partir de simulations GR-(M)HD des processus relativistes ayant lieu à proximité des objets compacts.

L'étude des contreparties X aux coalescences de trous noirs supermassifs est cruciale non seulement pour identifier ces sources transitoires parmi de nombreuses autres dans le champ de vue mais aussi pour permettre une interprétation exhaustive des futures données observationnelles. Cependant, prédire l'émission électromagnétique accompagnant les derniers stades de la coalescence constitue un travail complexe qui nécessite l'utilisation de simulations GR-(M)HD basées sur des métriques dépendantes du temps (ou au moins d'une approximation pertinente).

Objectifs de la thèse :

L'objectif de cette thèse porte sur deux aspects complémentaires, à l'interface entre simulations numériques et astrophysique observationnelle dans le domaine des rayons X : 1) la prédiction, grâce aux simulations numériques, des contreparties X aux coalescences de trous noirs supermassifs qui seront détectées par LISA ; 2) l'estimation, au travers d'une simulation « end-to-end », de la capacité d'ATHENA à détecter ces contreparties.

Selon le profil du doctorant, le travail de thèse pourra se focaliser sur différentes activités : a) le développement d'un pipeline destiné à produire des observations synthétiques à partir des simulations numériques ; b) l'implémentation numériques de métriques alternatives existantes pour simuler les processus d'accrétion aux voisinages des systèmes binaires de trous noirs ; c) le traitement de données en rayons X ; d) la contribution au développement du simulateur « end-to-end » du spectrographe X-IFU de la mission ATHENA.