

PROPOSITION DE THESE 2019

Ecoles doctorale : 560 Sciences de la Terre et de l'Environnement et Physique de l'Univers – Paris Diderot

Nom des proposants : Andrea Goldwurm, Régis Terrier

Thèmes scientifiques : Analyse de données d'astronomie X. Astrophysique de haute énergie. Accrétion et éjection dans les objets compacts. Accélération, interaction, propagation et rayonnement de particules.

Laboratoire d'accueil :

Laboratoire Astroparticule et Cosmologie (APC) – Paris (UMR 7164)

10, rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75205 Paris Cedex 13, Tel: 0157276058 et

Département d'Astrophysique /IRFU/DRF/CEA–Saclay, Bat. 709, 91191 Gif sur Yvette, Tel: 0169088669

E-mails: andrea.goldwurm@cea.fr; terrier@apc.univ-paris7.fr

Titre: Activité X de la région du Centre Galactique et de son trou noir super-massif avec un étude des techniques d'analyse des données de spectro-imagerie X de sources diffuses par les futures instruments à très large résolution spectrale

Resumé

Nous proposons de poursuivre l'étude de la base de données X de la région du centre Galactique (GC), issus des relevés réalisés avec les satellites XMM, Chandra et NuSTAR ces dernières années, et avec les données additionnelles qui seront collectés en 2019-2020, pour caractériser l'exceptionnelle activité de haute énergie de cette région (Fig. 1). L'objectif est de contraindre et comprendre l'activité éruptive passée de Sgr A*, le Trou Noir super-massif (SMCH) du noyau galactique, à partir des variations temporelles, spectrales et morphologiques de l'émission X des nuages moléculaires proches (Fig. 2) qui réfléchissent vers nous, avec un certain délai et des signatures spectrales spécifiques (Fig. 3), le rayonnement de Sgr A* qui les a illuminées, mais aussi en étudiant les grandes bulles de gaz chaud présentes dans la région (Fig. 4) qui témoignent d'activité encore plus ancienne localisée dans le noyau de notre Galaxie. Une partie importante de cet étude sera dédiée à développer une nouvelle approche de l'analyse de données qui puisse à la fois permettre le découplage des différents composants astrophysique et de bruit présents dans les données disponibles et aussi préparer l'exploitation de données X qui seront fournies par les nouveaux instruments à très haute résolution spectrale X prévus pour équiper les futures missions spatiales comme XRISM et Athena.

Title: X-ray activity of the Galactic Center region and its supermassive black hole with a study of new technics for the analysis of X-ray spectral-imaging data on diffuse sources from future very high spectral resolution instruments

Abstract

We propose to continue the study of the available X-ray data base of the Galactic Center (GC) region obtained from surveys carried out with the XMM, Chandra and Nu-STAR satellites, along with the additional data that will be collected in 2019-2020, in order to characterize the exceptional high-energy activity of this region (Fig. 1). The goal is to constrain and understand the outburst activity of the supermassive Black Hole of the galactic nucleus, Sgr A*, from the temporal, spectral and morphological variations of the X-ray emission of the nearby molecular clouds (Fig. 2) which reflects towards us, with a certain delay and specific spectral signatures (Fig. 3), the Sgr A* radiation which illuminated them, but also from the study of the large bubbles of hot gas present in the region (Fig. 4) and that witness the even more ancient activity originated in the GC. An important part of this study will be dedicated to develop a new approach for the data analysis that will allow to disentangle the different astrophysical components of the diffuse X-ray emission and the background present in the available data and also to prepare the exploitation of X-ray data provided by the new very high energy resolution instruments that will equip the future space missions like XRISM and Athena.

Description du sujet :

Conteste

Le Centre Galactique (la région centrale de la Galaxie d'environ $4^\circ \times 2^\circ$ correspondante à $550 \text{ pc} \times 300 \text{ pc}$ à 8 kpc de distance) abrite le trou noir super-massif de la Galaxie, identifié avec la source compacte radio, infrarouge et X *Sgr A**, dans un environnement complexe où s'entremêlent différentes sources X ponctuelles et diffuses (binaires, restes de supernovæ, lobes de gaz chaud, filament non-thermiques, etc.) (Fig. 1). Nous proposons de poursuivre le travail d'étude de la large base de données X (Chandra, XMM-Newton, NuSTAR) de cette région que nous menons depuis plusieurs années (voir Clavel et al. A&A 2013, Ponti et al. MNRAS 2015, Terrier et al. A&A 2017, Chuard et al. A&A 2017, Fig. 2) pour notamment contraindre l'émission X présente et passée et les propriétés du trou noir super-massif central mais aussi celles des sources thermiques et non-thermiques environnantes qui témoignent de l'exceptionnelle activité de haute énergie de la zone moléculaire centrale de la Galaxie.

Cette région du ciel contient en effet plusieurs composantes diffuses, certaines avec des variations morphologiques d'une année à l'autre et avec des raies d'émission prononcées, ainsi qu'un bruit de fond variable. Pour exploiter en détail ces données sera donc nécessaire développer des nouvelles méthodes d'analyse qui préparent aussi l'exploitation des données de type totalement nouveau. Les futures missions spatiales d'astronomie X prévoient, en effet, la mise en orbite de télescopes associés à des bolomètres à très large résolution spectrale ($E/DE \sim 1000$), couplés en général à des instruments d'imagerie fine à grand champ. C'est le cas de la mission japonaise - américaine XRISM, le remplacement de Hitomi, que sera lancée en 2021 ainsi que de la mission ESA de type Large, Athena, prévue vers 2030 qui notamment portera le spectromètre haute résolution X-IFU et la camera à grand champ WFI.

Description du Travail et Méthodes

Ces observatoires affichent des performances inégalées et permettront des avancées exceptionnelles en astrophysique des hautes énergies, comme l'attestent les quelques données collectées avec la mission Hitomi en 2016 en un seul mois d'opérations avant sa fin précoce. Les données que ces missions fourniront seront très riches, mais aussi très complexes, portant des informations complètement nouvelles, qu'il conviendra extraire avec des techniques sophistiquées. Les méthodes actuelles d'analyse ne sont certainement pas optimisées pour cela, notamment dans le domaine de l'analyse de sources diffuses dans des régions du ciel complexes comme le Centre Galactique. Pour ces sources, il est nécessaire d'un côté extraire les informations sur la morphologie et les spectres et dans le même temps de pouvoir séparer les différentes composantes qui se superposent avec un bruit de fond qui dépend des conditions d'observation.

L'approche actuelle pour traiter les données des observatoires X comme Chandra et XMM, est basée sur une séparation totale entre les analyses spatiale et spectroscopique (par exemple en réalisant une image correspondant à une raie spectrale, ou en extrayant le spectre de petites régions indépendantes les unes des autres). Une telle approche rend très délicate l'étude détaillée des structures étendues, en particulier des composantes faibles. Avec une résolution spectrale extrêmement fine cette méthode n'est plus valable puisque la prise en compte de la dépendance de la réponse instrumentale avec la position devient cruciale.

Nous proposons donc d'étudier, développer et tester des nouvelles techniques d'analyse basées sur une approche de spectro-imagerie pleinement 3D et multi-instrument. Une approche 3D paramétrique où les données sont comparées à des modèles spectraux des différentes composantes sera tout d'abord mise en place. Elle permettra l'utilisation de formats de données et de fonctions d'instrument adaptées à l'analyse 3D. Nous passerons ensuite à une analyse de type non paramétrique où les composantes spatiales sont définies par des fonctions génériques avec un critère de régularité, par exemple à l'aide du maximum de vraisemblance pénalisé et des fonctions splines (P-splines). Pour garder la puissance de la résolution spectrale, les composantes spectrales seront basées sur les modèles paramétriques usuels en rayons X (XSpec). La combinaison des données d'autres instruments (par exemple des imageurs à grand champs avec résolution en énergie moindre mais résolution spatiale fine) ainsi que l'apport du « dithering » et du « defocussing » (prévus pour la mission Athena) seront intégrés directement dans l'analyse, afin d'extraire le maximum d'information des observations.

Bien que visant les missions futures, ces techniques seront vérifiées et calibrées sur les données disponibles, Chandra et XMM, du Centre Galactique en comparant les résultats avec ceux des méthodes classiques obtenues dans la première phase du travail de thèse. Ensuite elles pourront être utilisées sur les données du spectromètre d'Hitomi (résolution spectrale de 7 eV), obtenues lors des observations de l'amas de galaxies de Persée, une région étendue et complexe de gaz intergalactique avec la présence du noyau de galaxie actif très lumineux à son centre.

L'interprétation astrophysique des résultats obtenus sur l'émission thermique et non-thermique du Centre Galactique sera développée dans le cadre de cette thèse avec une attention particulière aux indices sur l'intense activité passée du trou noir super-massif central.

Formation requise

Le candidat doit être possession d'un diplôme de master recherche en astrophysique ou astro-particules avec une préparation importante en astrophysique des hautes énergies. Des connaissances solides des techniques d'analyse statistique et de traitement d'images sont aussi souhaitables. Un stage de master 2 en analyse des données X du Centre Galactique est proposé en 2019 dans ce même cadre et il est fortement conseillé.

Encadrement, financement, collaborations et perspectives :

Encadrement: Le travail de thèse se déroulera au laboratoire APC et éventuellement au DAp/CEA sous la direction de Andrea Goldwurm (DR au DAp/IRFU/CEA Saclay et à APC, HDR, thèses encadrées ou co-encadrées: 7), Regis Terrier (CR CNRS au laboratoire APC, thèses encadrées ou co-encadrées: 4)

Financements: financement CNES demandé, soutien à candidature CFR/CEA et à bourse de thèse ED560.

Collaborations: S. Gabici, A. Lemièrre, APC; M. Morris, UCLA (US), M. Clavel, IPAG (F) ; G. Ponti, Obs. Merate (I) et MPE Garching (D).

Perspectives :

Au terme de sa thèse le candidat aura acquis une vaste expertise dans le domaine du traitement et de l'interprétation de données X et pourra s'insérer dans des laboratoires ou au sein des équipes qui travaillent dans les domaines de l'astrophysique des hautes énergies et de l'astro-particule. La préparation scientifique acquise permettra aussi de postuler avec succès dans le secteur privé où les techniques d'analyse statistique et/ou la méthode et la rigueur scientifique sont requises.

Bibliographie

- | | |
|--|---|
| [1] Goldwurm, A., et al., 1994, Nat, 371, 589 | [10] Ponti, G., et al., 2013, ASSP, 34, 331 |
| [2] Goldwurm, A., et al., 2003, ApJ, 584, 751 | [11] Clavel, M., et al., 2013, A&A, 558, 32 |
| [3] Bélanger, G., et al., 2005, ApJ, 635, 1095 | [12] Clavel, M., et al., 2014, MNRAS, 443, 129 |
| [4] Bélanger, G., et al., 2004, ApJ, 601, L163 | [13] Ponti, G., et al., 2015, MNRAS, 453, 172 |
| [5] Bélanger, G., et al., 2006, ApJ, 636, 275 | [14] Ponti, G., et al., 2015, MNRAS, 454, 1525. |
| [6] Trap, G., et al., 2010, Ad.S.R., 45, 507 | [15] Chuard, D., et al., 2018, A&A, 610, 34 |
| [7] Trap, G., et al., 2011, A&A, 528, 140 | [16] Terrier, R., et al., 2018, A&A, 612, 102 |
| [8] Ponti, G., et al., 2010, ApJ, 714, 732 | |
| [9] Terrier, R., et al., 2010, ApJ, 719, 143 | |

Thèses et Stages précédents sur le sujet (encadrement d'A. Goldwurm et/ou de R. Terrier)

- 1) M. Vargas, Thèse de doctorat, 1994-1997, Un. Paris 7, *Etude du Centre Galactique avec le télescope SIGMA.*
- 2) E. Brion, Stage DEA, 2002, Un. Strasbourg, *Etude de la source Sgr A* au centre galactique avec XMM.*
- 3) G. Bélanger, Thèse de doctorat, 2003-2006, Un. Paris 7 (A&A), *The Milky Way's Central Black Hole and its Environment: High Energy Observations with INTEGRAL and XMM-Newton.*
- 4) G. Trap, Stage Master 2, 2007, Un. Paris 11 (Master NPAC), *Le trou noir du Sagittaire.*
- 5) G. Trap, Thèse de doctorat 2007-2010, Un. Paris 7 (NPAC), *Etude du trou noir massif central de la Galaxie et de son environnement.*
- 6) M. Clavel, Stage Master 2, 2011, Un. Paris 11 (Master A&A).
- 7) M. Clavel, Thèse de doctorat 2011-2014, Un. Paris 11 (A&A), *Activité du trou noir massif au centre de la Galaxie.*
- 8) D. Chuard, Thèse de doctorat 2015-2018, Un. Paris Diderot (STEPUP), *Échos X dans la zone moléculaire centrale.*

Communiquées de presse, sites de communication

<http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/1894.htm>

http://irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=actu&id_ast=2791

http://irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=actu&id_ast=1266

http://irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=actu&id_ast=1317

http://irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=3599

http://chandra.harvard.edu/photo/2013/sgra_echoes/

<https://sciences-techniques.cnes.fr/fr/bulles-et-filaments-au-coeur-de-la-voie-lactee>

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/The_tumultuous_heart_of_our_Galaxy

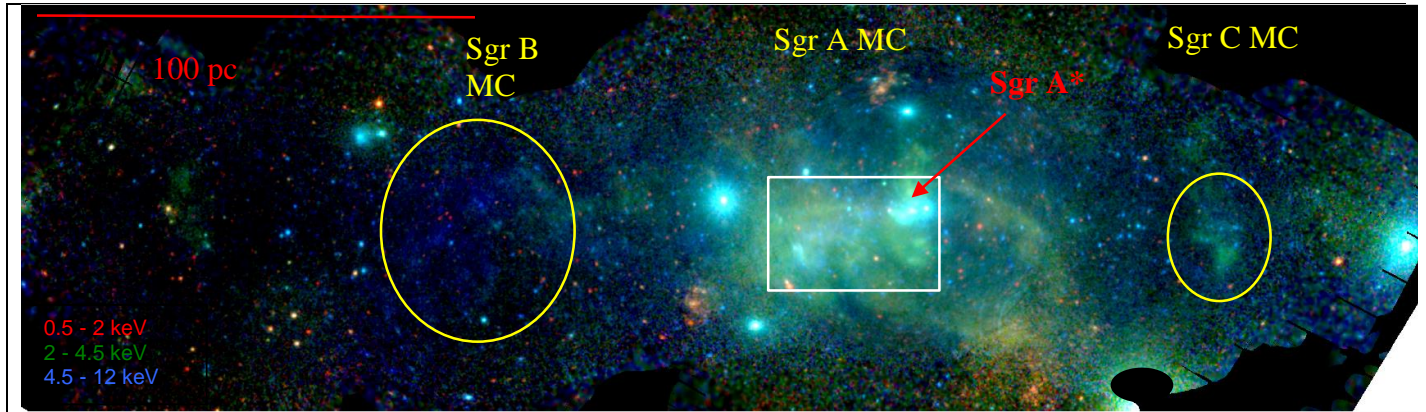


Fig. 1 3-Color image of the inner region of the galaxy obtained with the 2012 XMM-Newton Galactic Center survey. The 3 colors corresponding to different energy bands in the range 0.5 – 12 keV. Sgr A* and the main molecular cloud complexes are indicated [14].

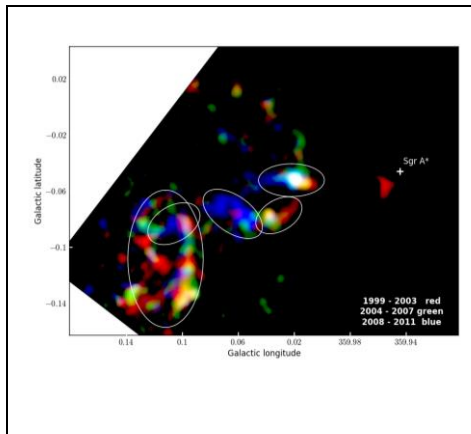


Fig. 2 Chandra intensity image at 6.4 keV (energy of Fe K α line) of the region including the molecular clouds of the Sgr A complex ($0.1^\circ \sim 14$ pc) at different epochs. Sgr A* location is indicated by a cross [11].

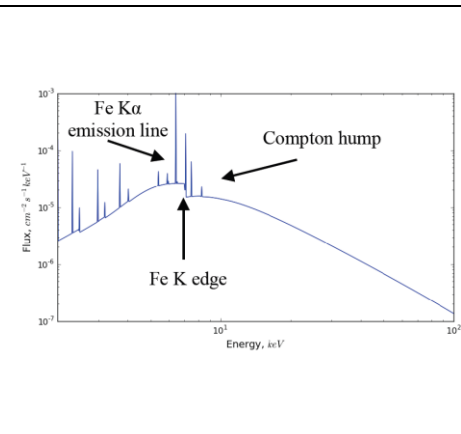


Fig. 3 Reflection spectrum of X-ray radiation from an external source by neutral cold gas cloud. Fluorescence lines of different elements, the Fe K α line at 6.4 keV, the Fe K edge and the scattered continuum are well visible.

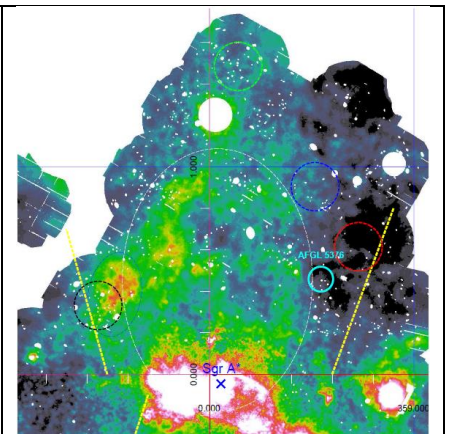


Fig. 4 Preliminary XMM Images of the North Galactic Center Lobe in the energy band 1.5-5 keV. An oval structure of hot gas with origin the Centre of the Galaxy is clearly (dashed ellipse) (Ponti et al. 2019, in preparation).