OFFRE DE STAGE M2 (2027)

Modélisation tridimensionnelle du Centre Galactique : du gaz moléculaire à l'émission gamma, contraintes avec H.E.S.S. et perspectives pour CTAO.

Contexte scientifique

Le Centre Galactique est un environnement astrophysique extrême, où se concentrent la matière moléculaire sous forme de nuages denses (la Zone Moléculaire Centrale, CMZ), une population de sources de haute énergie telles que des restes de supenovae, des pulsars, ou encore le trou noir supermassif Sagitarus A* et une population de rayons cosmiques qui peuvent atteindre des densités particulièrement élevées. Les observations en rayons gamma réalisées par le réseau de télescopes H.E.S.S. depuis 20 ans révèlent la présence d'une source gamma compacte, HESS J1745−290, située à quelques secondes d'arc seulement de Sgr A*, et une émission diffuse qui s'étend sur plus de 200 parsecs le long du plan galactique. La nature de HESS J1745−290 reste à ce jour indéterminée, de même que l'accélérateur à l'origine de l'émission diffuse observée. L'émission diffuse constitue une sonde privilégiée de l'interaction entre les rayons cosmiques et la matière interstellaire, cependant, son interprétation reste limitée par une incertitude majeure : la distribution tridimensionnelle du gaz dans la zone moléculaire centrale et notamment la position des nuages le long de la ligne de visée.

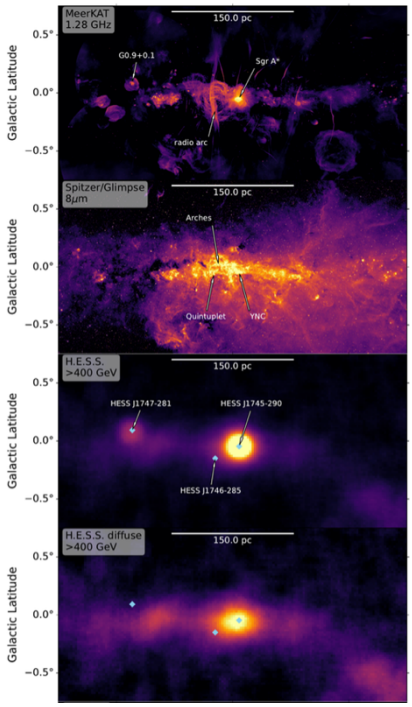


Figure 1 : Vue multi-longueurs d'onde de la région du Centre galactique : en radio (MeerKAT, 1,28 GHz,), en infrarouge (Spitzer/GLIMPSE, 8 μm),; en rayons gamma.. L'émission diffuse de très haute énergie apparaît après soustraction de la contribution des deux sources les plus brillantes (HESS J1745-290 et HESS J1747-281). Elle est corrélée à la présence de gaz dense dans cette région.



Figure 2 : Photo du réseau de télescopes Cherenkov H.E.S.S en Namibie. llustration du futur réseau de télescopes Cherenkov CTAO dans l'hémisphère Sud.

Des travaux récents (Battersby et al. (2025), Walker et al. (2025) et Lipman et al. (2026)) apportent de nouvelles contraintes sur la géométrie du CMZ, la structure des nuages moléculaires et leur organisation spatiale. Ces avancées ouvrent la voie à une modélisation 3D plus réaliste du Centre galactique et à une meilleure compréhension de la distribution et de la propagation des rayons cosmiques dans cet environnement.

Objectifs et déroulement du stage

L'objectif du stage est de construire un modèle tridimensionnel du gaz moléculaire au Centre Galactique, de prédire l'émission gamma associée à plusieurs populations de rayons cosmiques et de confronter ces prédictions aux observations de H.E.S.S., afin de mieux comprendre les propriétés des rayons cosmiques et de la matière dans cette région.

Dans un premier temps, le ou la stagiaire construira un modèle 3D du CMZ en combinant les contraintes géométriques et orbitales les plus récentes. Les structures des nuages moléculaires seront extraites des catalogues issus d'analyses hiérarchiques en dendrogrammes, et leurs masses estimées à partir des données disponibles sur le milieu interstellaire dans les travaux de Battersby et al. (2025) et Walker et al. (2025). Cette reconstruction permettra d'explorer différentes configurations spatiales de la matière et d'évaluer leur influence sur l'émission gamma prédite.

Ce modèle servira ensuite de cible pour tester plusieurs scénarios de distribution des rayons cosmiques : une densité décroissant comme l'inverse de la distance à Sagittarius A* (profil en 1/R), une distribution de sources spatialement distribuées ou encore une densité corrélée à celle du gaz. Le ou la stagiaire calculera les cartes d'émission gamma produites par les interactions entre les rayons cosmiques et le gaz, puis les comparera aux observations en rayons gamma de H.E.S.S. à l'aide de méthodes statistiques avancées, avec l'outil d'analyse de dernière génération Gammapy. Cette approche permettra de déterminer quels scénarios sont compatibles avec les observations et de quantifier l'impact des incertitudes sur la géométrie tridimensionnelle du gaz.

Dans un second temps, le stage portera sur les perspectives offertes par le Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO), la nouvelle génération d'observatoires de rayons gamma. À l'aide de simulations instrumentales et de Gammapy, le ou la stagiaire évaluera la capacité du CTAO à distinguer différentes positions le long de la ligne de visée pour plusieurs nuages majeurs du Centre Galactique.

Compétences acquises et perspectives

Ce stage permettra d'aborder une question centrale de l'astrophysique des hautes énergies en combinant la construction d'un modèle tridimensionnelle du CMZ, la physique des rayons cosmiques, et l'analyse statistique de données. Le ou la stagiaire se familiarisera avec des outils d'analyse de nouvelle génération, notamment Python scientifique et Gammapy, et contribuera à la préparation des futures analyses scientifiques de l'observatoire CTA.

Le profil recherché est celui d'un ou d'une étudiante en master 2 de physique des hautes énergies ou d'astrophysique, possédant des bases en Astrophysique des hautes énergies et en programmation Python. Une motivation pour la modélisation, l'analyse de données et l'exploration de phénomènes astrophysiques sera appréciée.

Ce stage pourra ouvrir la voie à une thèse consacrée à l'étude des sources et de la distribution et à la propagation des rayons cosmiques au Centre galactique, à l'interface entre les observations de H.E.S.S., les développements méthodologiques de Gammapy, les premières grandes études scientifiques de CTAO et l'analyse de donnée X des satellites XMM et Chandra. Une thèse prévue d'octobre 2027 à octobre 2030 verra coïncider sa troisième année avec l'arrivée des premières données scientifiques du CTAO.

Encadrement Scientifique

Régis TERRIER : rterrier@apc.in2p3.fr
Anne LEMIERE : alemiere@apc.in2p3.fr

Régis Terrier est le développeur principal de la bibliothèque logicielle d'analyse Gammapy. Il est spécialiste du Centre galactique dans les domaines des rayons X et des rayons gamma, et s'intéresse notamment à l'activité passée du trou noir supermassif (SMBH) situé au centre de notre Galaxie. Il est membre des collaborations H.E.S.S. et CTAO.

Anne Lemière est experte dans la production et le traitement des données en astronomie gamma. Elle est spécialiste du Centre galactique et de la distribution des rayons cosmiques et du gaz dans les régions centrales. Elle est membre des collaborations H.E.S.S. et CTAO.

Groupe gamma

Le laboratoire Astroparticule et Cosmologie (APC) est impliqué dans les **projets H.E.S.S. et CTAO.** Son groupe de recherche en astronomie gamma rassemble une équipe d'environ dix chercheurs permanents, trois chercheurs postdoctoraux et deux doctorants, actuellement en deuxième et troisième année de thèse.Dans le cadre de sa contribution au CTAO, l'équipe participe au développement des logiciels d'analyse scientifique de l'observatoire, qui s'appuient sur la bibliothèque Gammapy.