

Le champ magnétique intergalactique qui baigne les vides cosmiques, probable relique des premiers instants de l'Univers, reste insaisissable à toutes les mesures traditionnelles de champ magnétique. Cette thèse se propose d'utiliser une méthode innovante et d'étudier ses signatures dans les observations à très haute énergie de sursauts gamma (GRBs). Elle permettra notamment de prédire les capacités du futur observatoire CTA à contraindre ses propriétés. Selon l'intérêt du doctorant, le travail pourra inclure des parts plus ou moins importantes de modélisation et d'analyse de données.

The intergalactic magnetic field pervading the cosmic voids is suspected to be a relic field originating from the very first epoch of the cosmic history. The goal of this PhD is to look for signatures of this field in the high-energy data of gamma-ray bursts, and to predict the ability of the future CTA observatory to constrain its properties. This work combines both theoretical modelling and analysis of simulated CTA data.

Le contexte scientifique

Depuis une vingtaine d'années, l'avènement des télescopes Tcherenkov a permis le développement de l'astronomie gamma à très haute énergie (> 20 GeV), avec en particulier des retombées en cosmologie. La cosmologie gamma repose sur l'absorption, par la lumière infrarouge des galaxies, des rayons gamma émis par des sources lointaines de l'Univers. Cette absorption est en effet directement liée à l'histoire de la formation stellaire et au modèle cosmologique qui conditionne l'apparition des grandes structures de l'Univers.

L'absorption des rayons gamma (> 100 GeV) par les photons infrarouge produit des électrons et des positrons qui interagissent sur le fond diffus cosmologique et produisent à leur tour des rayons gamma. Ces rayons gamma secondaires peuvent eux-mêmes être absorbés, produisant en cascade de nouvelles paires électron-positron. Ces cascades électromagnétiques se développent dans le milieu intergalactique et possèdent différentes signatures qui sont activement recherchées dans les données, notamment dans la mesure où elles permettent de contraindre les propriétés du champ magnétique intergalactique (*Intergalactic Magnetic Field*, IGMF), champ dont l'origine remonte probablement aux premiers instants de l'Univers [1] et qui reste inaccessible aux mesures traditionnelles (les mesures directes permettent seulement de contraindre l'intensité du champs à $B < 10^{-9}$ G).

Les particules chargées de la gerbe étant déviées par le champ magnétique, ce dernier est à la fois responsable d'un étalement spatial de la source sur les observations, un halo [2], et d'un retard dans l'arrivée des photons secondaires, un écho [3]. La recherche de halo de noyaux actifs de galaxie (AGN) est devenue récemment une technique classique qui a déjà permis d'établir des limites inférieures sur l'intensité moyenne de l'IGMF ($B > 10^{-17}$ - 10^{-16} G) au prix de certaines hypothèses [4]. Lors de cette thèse nous proposons d'utiliser une méthode innovante basée sur la recherche de retards temporels dans l'émission des sursauts

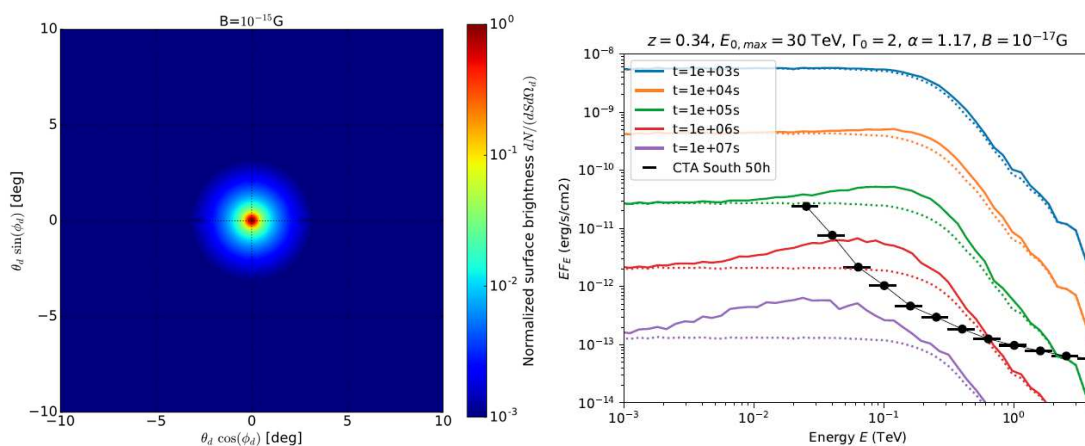


Figure 1: A gauche : halo diffus simulé autour d'une source gamma ponctuelle. A droite : évolution temporelle simulée d'un spectre de GRB. L'excès entre le flux intrinsèque de la source (pointillés) et le flux total (traits pleins) correspond à l'écho de la cascade.

gamma [7-9]. Cette nouvelle approche repose sur des hypothèses différentes de celle utilisée dans la recherche de halos et permettra donc d'établir des contraintes indépendantes et complémentaires. Elle nécessite cependant à la fois des sources gamma transitoires et des observations très sensibles, deux points en pleine révolution.

Les sursauts gamma représentent des cibles privilégiées pour une telle étude. Ils sont par nature brefs et ont longtemps été suspectés de pouvoir émettre jusqu'au TeV. Cette dernière hypothèse s'est vu confirmée de manière éclatante en 2019 avec les premières détections par des observatoires Tcherenkov [5,6], permettant enfin d'utiliser ces sources comme sondes cosmologiques [7-9].

Si les premières détections ont été obtenues avec HESS et MAGIC après des années de recherche, l'observatoire CTA promet de révolutionner le domaine avec des taux de détection de GRB très prometteurs (1 à 10 par an), ouvrant des perspectives inédites pour étudier le champ magnétique intergalactique [10]. Le premier grand télescope de 23 m a commencé sa prise de données à proximité des deux grands télescopes de MAGIC, laissant espérer plusieurs détections durant la thèse.

Le sujet

Le but de la thèse est l'étude des cascades issues des sursauts gamma (GRB) et les contraintes qu'elles peuvent apporter sur l'IGMF, dans le contexte particulier de CTA.

Le travail de recherche s'articule autour de trois aspects complémentaires qui pourront être plus ou moins approfondis par le doctorant selon son intérêt :

- Un aspect théorique de modélisation des cascades. L'équipe possède un code Monte Carlo qui décrit le développement des cascades et qui prédit les altérations du flux gamma par le champ magnétique [11]. Ce code est opérationnel. Il permettra d'étudier l'influence des caractéristiques du champ magnétique (intensité, échelles des variations d'uniformité) sur le flux secondaire de rayons gamma.
- Un aspect instrumental pour simuler la réponse de CTA, à différents niveaux de détail, en utilisant un code destiné à prédire le futur catalogue de sursauts de CTA [12]. Des premiers résultats seront obtenus rapidement par de simples comparaisons aux courbes de sensibilité mais il faudra ensuite utiliser des fonctions de réponse plus précises, résultant de la mise en opération des premiers télescopes de CTA.
- Enfin, une phase d'analyse qui permettra de définir des stratégies d'observation optimisées pour l'étude des cascades de GRB (à quel moment observer et combien de temps), et qui permettra d'améliorer encore les contraintes que CTA pourra apporter sur l'IGMF.

Cette méthodologie sera appliquée dans différents cas :

- L'étudiant s'intéressera dans un premier temps à quelques sursauts individuels, détectés par H.E.S.S., MAGIC et le satellite Fermi. L'extrapolation à CTA permettra d'identifier les contraintes sur l'IGMF qui pourront être apportées avec des sursauts similaires et de commencer à définir une stratégie d'observation. Cette phase permettra également de cerner les propriétés des GRB qui permettront les contraintes les plus précises.
- Une étude de population permettra également de déterminer la fréquence avec laquelle de tels GRB pourront être observés par CTA. Un catalogue de plusieurs centaines de sources simulées existe déjà [13]. Il faudra en outre prendre en compte les propriétés statistiques des conditions d'observation (position dans le ciel, qualité de l'atmosphère, lune, etc.).

L'équipe

Le consortium CTA rassemble 1500 scientifiques de 31 pays dans le monde. La thèse se déroulera au sein du groupe CTA du département d'astrophysique de l'Irfu. Le groupe compte une demi-douzaine de scientifiques, exploitant déjà ou ayant exploité les données d'autres télescopes comme HESS ou le satellite Fermi, et couvrant les thématiques scientifiques allant de l'astrophysique galactique aux sursauts gamma. Il est engagé dans les études préparatoires à l'analyse des données de CTA. Il développe des outils novateurs pour la reconstruction des gerbes atmosphériques et l'analyse des images du ciel. Le développement des logiciels de la chaîne de traitement des données du consortium est notamment coordonné au sein du groupe. L'étudiant sera conduit à participer à des réunions du groupe logiciel CTA, aux réunions des groupes scientifiques pertinents pour le sujet et aux réunions générales CTA dans les pays participants, membres du consortium.

Mots-clés : Modélisation, analyse des données, GRB, cosmologie, champ magnétique primordial, observatoire CTA

[1] *Cosmological Magnetic fields : their generation, evolution and observation*, Durrer R. et Neronov A., A&A 21 (2013), 62

[2] *A method of measurement of extragalactic magnetic fields by TeV gamma ray telescopes*, Neronov, A. et Semikoz, D., JETP Letters 85 (2007), 10

[3] *Detecting intergalactic magnetic fields using time delays in pulses of gamma-rays*, R. Plaga, Nature 374 (1995), 430

[4] *Search for spatial extension in high-latitude sources detected by the Fermi LAT*, Ackerman et al., The Astrophysical Journal Supplement Series, 237:32 (2018)

[5] *A very-high-energy component deep in the γ -ray burst afterglow*, collab. H.E.S.S., Nature 575 (2019) 464–467

[6] *Tera-electronvolt emission from the γ -ray burst GRB 190114C*, collab. MAGIC, Nature 575 (2019) 455–458

[7] *Properties of the intergalactic Magnetic field constrained by observations of gamma-ray bursts*, Veres, P. et al., ApJ (2017) 847

[8] *Constraints on the intergalactic magnetic field from observations of GRB 190114C*, Wang Z.-R. et al., Phys. Rev. D (2020), 110, 8

-
- [9] *Can we constrain the extragalactic magnetic field from very high energy observations of GRB190114C?*, Dzhatdoev et al., Soumis (2020).
- [10] *Sensitivity of the CTA for probing cosmology and fundamental physics for gamma-ray propagation*, collab. CTA, soumis à JCAP (2020)
- [11] *Physics of cosmological cascades and observable properties*, Fitoussi T. et al., MNRAS 466 (2017), p. 3472
- [12] SoHAPPy, <https://github.com/tstolarczyk/SoHAPPy>
- [13] *POSyTIVE - a GRB population study for the Cherenkov Telescope Array*, M. G. Bernardini et al., 36th International Cosmic Ray Conference - ICRC2019, Madison, WI, U.S.A.

Cette thèse peut être précédée d'un stage de M2.

<p><u>M2 recommandés</u> : Astrophysique, astroparticules</p> <p><u>Date souhaitée</u> : Septembre 2023 – Septembre 2026</p> <p><u>Compétences techniques</u> : programmation (Fortran, python) sous Linux, outils d'analyse en astronomie.</p> <p><u>Lieu de la thèse</u> CEA Saclay, IRFU/DAP, Orme des Merisiers, bât. 709, 91191 Gif-sur-Yvette</p>	<p><u>Pour en savoir plus</u></p> <p>CTA : http://www.cta-observatory.org/ Irfu : http://irfu.cea.fr DAP : http://irfu.cea.fr/dap/ Page de l'équipe CTA: http://irfu.cea.fr/dap/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_technique.php?id_ast=3709</p>
---	---