

Séparation de composantes spectrales dans les vestiges de supernova

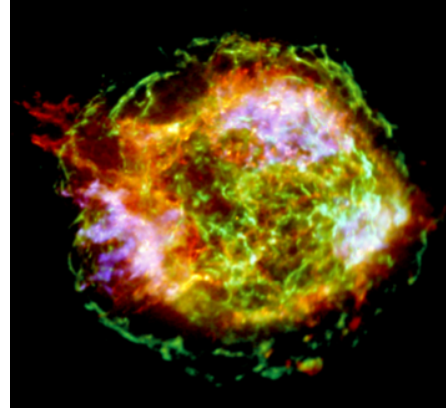
Contact : fabio.acero@cea.fr

Images et animations : www.github.com/facero/sujets2017

Résumé

L'objectif de cette thèse est de comprendre comment les différences d'environnement influent sur le mécanisme d'accélération de particules au choc des vestiges de supernova. Pour cela les algorithmes de séparation de source à l'aveugle, similaires à ceux développés au laboratoire pour l'étude du CMB avec Planck, seront appliqués aux données en rayons X et en rayons gamma. Ces méthodes serviront à séparer les différentes composantes spectrales dans les vestiges de supernova qui évoluent dans des milieux ambiants complexes afin de comprendre l'impact des différences d'environnement sur le processus d'accélération au choc. Ce travail d'adaptation d'outils utilisés en cosmologie servira dans un contexte plus général à tout détecteur ayant des capacités de spectro-imagerie comme c'est le cas en astronomie des hautes énergies (où les photons sont enregistrés un à un) mais aussi potentiellement dans d'autres domaines de la physique.

Mots clés : Vestiges de supernova, rayons X/gamma, télescopes XMM, Fermi, algorithme de séparation de source, parcimonie, ondelettes.



*Gauche: Vestige de supernova RCW86 en rayons X (vert et bleu) et infrarouge (rouge).
Droite: Cas A en rayons X. Emission du silicium (rouge), du fer (bleu) et du synchrotron (vert).*

Les sources de rayons cosmiques dans notre Galaxie

Les rayons cosmiques (RCs) qui sillonnent notre galaxie sont des particules chargées composées à ~99% d'ions -essentiellement des protons- et de 1% d'électrons. Ils jouent un rôle clé dans le cycle de la matière et la chimie du milieu interstellaire. Aujourd'hui, plus d'un siècle après leur découverte, la question de l'origine et du mécanisme d'accélération de ces RCs est toujours posée. Les observations à différentes longueurs d'ondes suggèrent que les vestiges de supernova (supernova remnants; SNRs) sont les candidats privilégiés à l'origine des RCs galactiques. L'étude des mécanismes d'accélération se fait à travers l'étude du rayonnement (des ondes radio aux rayons gamma) produit par l'interaction in-situ de ces particules avec le milieu environnant. Dans ces études, les rayons X permettent de sonder les électrons accélérés à de très hautes énergies et les rayons gamma jouent un rôle particulier car ils représentent le seul moyen de sonder directement les propriétés des ions accélérés (99% des RCs).

Avec bientôt 8 ans d'observation, le satellite [Fermi](#) a révélé un ciel en rayons gamma (énergie du GeV) riche et complexe dans le plan galactique où certaines études sont désormais limitées non pas par la statistique mais par la superposition d'émission provenant de plusieurs sources ou par le mélange de différentes composantes spectrales d'une même source. Cet enchevêtrement nous limite dans la compréhension de l'origine de l'émission gamma et de ses propriétés dans les accélérateurs galactiques. Les télescopes à rayons X [Chandra](#) et [XMM](#), en opération depuis 2000, ont permis une avancée importante dans la compréhension de la physique qui a lieu dans les SNRs. Des observations très profondes (>100 h) permettent d'établir des cartographies fines des différentes composantes spectrales et d'étudier des composantes dont le flux est très faible. Dans ce cadre nous avons déposé une demande de Large Program XMM sur le prototype d'accélérateur RXJ 1713.7-3946 pour quadrupler le temps d'exposition moyen avec pour objectif de cartographier la faible émission du milieu interstellaire chauffé par l'onde de choc.

Analyse spatialement résolue des vestiges de supernova

Pour étudier les variations spatiales des composantes spectrales, la méthodologie classique est d'extraire des spectres de régions choisies «à l'œil» ou de définir une grille de régions dont la taille s'adapte au flux (ex : tessellation Voronoï). Ces méthodes regroupent les régions par un paramètre un peu arbitraire (le flux) alors qu'il est plus logique d'isoler les régions partageant un même spectre (même processus physique) ce que permettent les méthodes de séparation de composantes (voir section Méthodologie). En particulier cette thèse s'intéressera à l'étude des SNRs qui présentent des variations spectrales le long de leur coquille. Les variations des propriétés du milieu ambiant et du champ magnétique autour du SNR ont un fort effet sur l'efficacité du processus d'accélération au choc et sur la composante dominant l'émission en rayons gamma (électrons et ions accélérés ont des signatures spectrales au GeV bien différentes). Pour comprendre ces effets, des études spectrales spatialement résolues sont déjà communément effectuées dans toutes les autres longueurs d'ondes et les rayons gamma sont jusqu'à présent le dernier facteur limitant principalement à cause de la faible résolution angulaire (PSF) qui de plus varie fortement avec l'énergie. La définition de région se fait alors sur une image mélangeant énergies et PSF différentes. Les observations en rayons X bénéficient d'une meilleure PSF mais le nombre de composantes superposées est plus important. C'est ces verrous que nous nous proposons de lever pour définir les régions d'extractions spectrales et localiser les différentes composantes. Ces méthodes d'analyses seront aussi utiles pour [CTA](#) (la prochaine génération de télescope gamma du TeV au sol) et à moyen terme pour le télescope en rayons X à très haute résolution spectrale Athena.

Méthodologie

Les techniques de séparation de composantes développées par l'équipe [CosmoStat](#) (e.g. algorithme GMCA pour Generalized Morphological Component Analysis) ont récemment permis d'obtenir une [carte du CMB](#) à partir des données Planck. Inspirées de récentes avancées en mathématiques appliquées, en particulier la modélisation parcimonieuse des signaux, ces méthodes ont permis une bien meilleure estimation du CMB par séparation des avants plans que celle permise jusqu'alors avec des méthodes classiques. Ces algorithmes n'ont jusqu'à présent jamais été testés en astronomie de comptage de photons (ex: rayons X/gamma).

La première étape de cette thèse sera de transposer ces outils aux données en rayons X qui montrent des raies d'émission facilement identifiables, bénéficiant d'une grande statistique et d'une bonne PSF quasi-constante en énergie. Ceci permettra de cartographier les différentes raies d'émission des produits de la nucléosynthèse (Si, Mg, Fe, etc) dans les supernovae, l'émission synchrotron ou le milieu interstellaire choqué. Dans un deuxième temps cette méthode sera étendue aux observations gamma de Fermi pour identifier les différentes composantes spectrales dans un SNR. Ceci nécessitera de modéliser la variation de la PSF avec l'énergie ainsi que la prise en compte de la statistique de Poisson de ces données. Du point de vue de l'interprétation, les données spectrales recueillies seront modélisées avec le code d'accélération de particules [CRAFT](#) développé par D. Caprioli (Princeton) avec qui nous collaborons. Cet outil qui prend en compte l'évolution temporelle du SNR et les caractéristiques du milieu ambiant ainsi que les dernières avancées théoriques en la matière permet d'aller au-delà des simples modélisations à une zone. Cette analyse s'effectuera dans un contexte multi-longueur d'ondes (radio, X, rayons gamma du GeV et du TeV) et permettra de contraindre les caractéristiques des populations de particules accélérées en fonction des conditions extérieures du milieu ambiant.

L'astronomie des hautes énergies au CEA

L'astronomie en rayons X a historiquement ouvert l'ère de l'exploration spatiale au CEA. Depuis ce premier vol en ballon en 1965, le SAp/AIM a su conserver son rôle moteur dans les grandes missions spatiales en rayons X en opération (XMM, Integral) ou en préparation (Athena). Une des forces majeures du laboratoire est l'implication à tous les niveaux d'une mission scientifique (instrumentation, outils de traitement et d'analyse et théorie/interprétation). Ce sujet s'appuie sur plusieurs de ces fondamentaux et est l'union d'expertises uniques au CEA : le développement de télescopes pour les hautes énergies et les compétences uniques en France du groupe Cosmostat, laboratoire spécialisé en statistique et traitement du signal appliqué à l'astrophysique.

L'étudiant travaillera au sein de l'équipe haute énergie en partenariat avec J. Bobin du groupe Cosmostat. L'équipe haute énergie a une expérience reconnue dans la modélisation et l'analyse de données X/gamma et est un des acteurs principaux pour l'étude des SNRs en France. Le laboratoire est un des moteurs du projet [CTA](#) dont les premières lumières sont attendues courant 2018 pendant la durée de cette thèse.