

## Séparation de composantes dans les vestiges de supernova

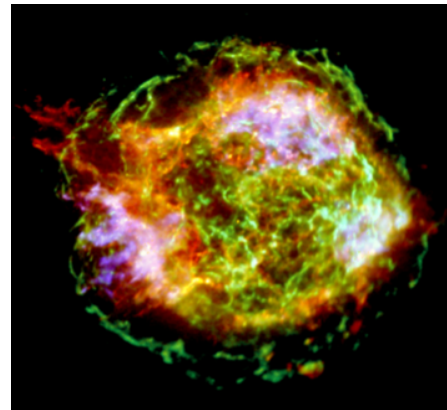
Contact : [fabio.acero@cea.fr](mailto:fabio.acero@cea.fr)

Images et animations : [www.github.com/facero/sujets2017](http://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 (ou semi aveugle), similaires à ceux développés au laboratoire pour l'étude du CMB avec Planck, seront appliqués aux données en rayons X et aux données en rayons gamma du satellite Fermi. Ces méthodes serviront à séparer les différentes composantes spectrales dans les vestiges de supernova qui évoluent dans des milieux ambiants complexes et à comprendre l'impact des différences d'environnement sur le processus d'accélération au choc. Ce travail d'adaptation d'outils Planck servira dans un contexte plus général à tout télescope ayant des capacités de spectro-imagerie et en particulier à l'astronomie des hautes énergies (où les photons sont enregistrés un à un).

**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: CasA 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 pulsars, nébuleuses de pulsars et 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 haute 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 Project 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 gamma 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. C'est ce verrou que nous nous proposons de lever pour localiser dans les sources étendues les différentes composantes spectrales en travaillant sur le cube en énergie et en intégrant la dépendance de la PSF. Ces méthodes d'analyses seront aussi utiles pour [CTA](#) (la prochaine génération de télescope gamma du TeV au sol) et tout autre instrument ayant des capacités de spectro-imagerie.

### **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](#) avec les 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 par exemple les différentes raies d'émission des produits de la nucléosynthèse (Si, Mg, Fe, etc) dans les supernovae. 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.

### **Environnement de travail**

Ces travaux se dérouleront au sein de l'équipe haute énergie du laboratoire [AIM](#) au CEA-Saclay et en partenariat avec J. Bobin du groupe Cosmostat, laboratoire spécialisé en statistique et traitement du signal appliqué à l'astrophysique. L'équipe haute énergie a une expérience reconnue dans la modélisation et l'analyse de données X et gamma (télescopes XMM, Integral, Fermi, HESS) et est un des acteurs principaux pour l'étude de l'émission diffuse avec Fermi et un des laboratoires moteurs en France du projet [CTA](#), dont les premières lumières sont attendues courant 2018 pendant la durée de cette thèse.