

LES RESTES DE SUPERNOVA AVEC FERMI, CTA, ET L'ORIGINE DES RAYONS COSMIQUES

Supernova remnants with Fermi, CTA, and the cosmic ray origin

CEA Saclay
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Service d'astrophysique

Jean Ballet, +33 1 69 08 70 17, jean.ballet@cea.fr

Thierry Stolarczyk, +33 1 69 08 78 12, thierry.stolarczyk@cea.fr

Résumé L'objectif de la thèse est d'étudier l'émission en rayons gamma des restes de supernova et de voir ainsi l'accélération de rayons cosmiques à l'œuvre. L'étude s'appuiera essentiellement sur les observations par le satellite *Fermi* (énergies de 30 MeV à 300 GeV). Les résultats obtenus contribueront au programme scientifique de *CTA*, un observatoire en préparation, couvrant des énergies de 50 GeV à plusieurs dizaines de TeV et qui aura une sensibilité dix fois meilleure que les instruments Tcherenkov actuels (*Hess, Magic, Veritas*). Le travail de thèse comporte plusieurs volets:

- confronter le spectre en énergie de quelques restes de supernova brillants, déjà détectés par le satellite *Fermi* et par les télescopes Tcherenkov actuels, à des modèles existants en s'appuyant sur des observations en ondes radio et en rayons X ;
- participer à la construction du catalogue de restes de supernova au GeV sur la base des relevés de *Fermi* ;
- modéliser la population de restes de supernova galactiques dans la gamme d'énergie s'étendant du GeV au TeV ;
- à partir des résultats obtenus, prédire semi-quantitativement la population qui pourrait être découverte par *CTA* et isoler quelques cibles d'intérêt particulier pour les futures observations.

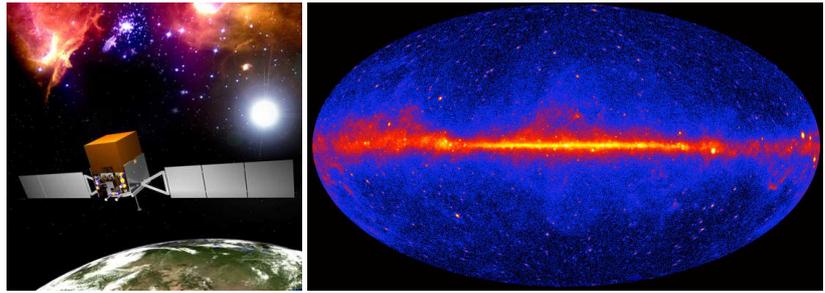
Mots-clefs : reste de supernova, rayons cosmiques, rayons gamma, accélération de Fermi, satellite Fermi, observatoire CTA

Abstract *The goal of the PhD is the study of supernova remnants with gamma rays, trying to pin down the acceleration sites of high energy cosmic rays. The study will be essentially based on observations by the Fermi satellite (covering the energy range 30 MeV-300 GeV). The results obtained shall contribute to the scientific program of CTA, an observatory in its prototyping phase covering energies from 50 GeV to beyond 10 TeV, expected to improve the sensitivity of the current Cherenkov instruments by a factor of ten. Several aspects will be explored:*

- *Spectral modelling of a few bright supernova remnants detected by Fermi and by Cherenkov telescopes, in the light of radio and X-ray observations;*
- *Participating in building the Fermi catalogue of supernova remnants at GeV energies;*
- *Developing a population model for galactic supernova remnants in the GeV-TeV energy range on the basis of theoretical expectations;*
- *Applying this population model to predict the discovery potential of CTA in a semi-quantitative way, and developing candidate selection criteria for detailed CTA observations.*

Keywords: supernova remnants, cosmic rays, gamma rays, Fermi acceleration, Fermi satellite, CTA observatory

L'exploration du ciel en rayons gamma permet d'étudier les phénomènes cosmiques violents de l'Univers. L'objectif principal de la thèse est de caractériser l'émission gamma des restes de supernova et de voir ainsi l'accélération de rayons cosmiques à l'œuvre dans la Galaxie. Pour cela les données du satellite *Fermi* seront analysées



Satellite Fermi : vue d'artiste et carte du ciel.

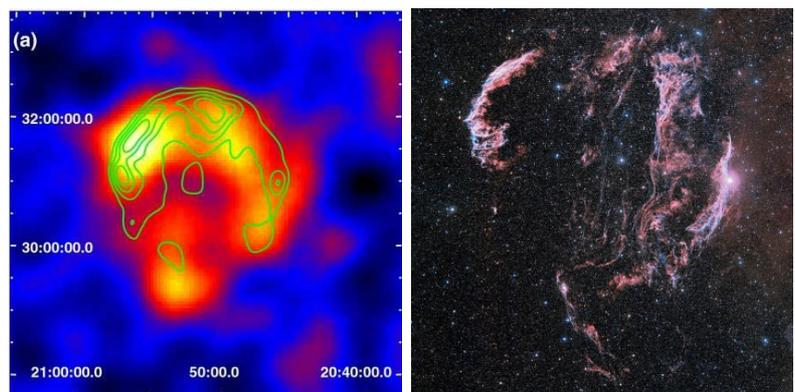
puis confrontées aux résultats publiés à l'aide d'autres instruments, en particulier les télescopes Tcherenkov au sol. Ces études permettront d'établir le potentiel du futur observatoire *CTA* dans ce domaine.

Les rayons cosmiques sont la quatrième composante du milieu interstellaire : leur densité d'énergie est à égalité avec la densité du gaz, du rayonnement et du champ magnétique. Les ondes de choc engendrées par l'explosion des supernovæ devraient pouvoir fournir la puissance nécessaire à l'ensemble des rayons cosmiques galactiques, si le mécanisme d'accélération de Fermi, proposé il y a 30 ans, en est à l'origine. En tenant compte de la propagation dans la Galaxie, ce mécanisme permet de reproduire en bonne approximation la distribution en énergie des rayons cosmiques observés sur Terre.

Le satellite *Fermi*, lancé en juin 2008, est un observatoire à grand champ de vue de la NASA détectant les rayons gamma entre 30 MeV et 300 GeV. Il permet de cartographier l'ensemble de la voûte céleste en permanence, avec une résolution angulaire allant du degré à $0,1^\circ$ lorsque l'énergie croît. Le catalogue de *Fermi* comporte environ trois mille sources obtenues en quatre ans d'observations.

Les rayons gamma autour du TeV peuvent être observés depuis le sol grâce au faible éclair de lumière Tcherenkov qu'ils produisent en interagissant dans l'atmosphère. Les caméras des télescopes existant, *Hess*, *MAGIC* et *Veritas*, permettent d'obtenir une résolution angulaire de $0,1^\circ$. Une centaine de sources ont déjà été détectées ainsi, dont une vingtaine de restes de supernova. Le succès rencontré par les télescopes Tcherenkov au sol a poussé la communauté à proposer un instrument de seconde génération, appelé *CTA* (Cherenkov Telescope Array). L'observatoire *CTA* comportera deux sites, l'un dans l'hémisphère nord l'autre dans l'hémisphère sud. Ce dernier disposera d'un réseau d'une centaine de télescopes, répartis sur 10 km^2 , pour sonder en particulier le plan galactique. Son exploitation commencera dans quelques années, et pourrait conduire à terme à un catalogue de plusieurs milliers de sources au TeV. Le consortium *CTA* rassemble une large communauté de plus d'un millier de scientifiques dans 25 pays.

L'émission synchrotron X de plusieurs restes de supernova atteste de l'accélération d'électrons à haute énergie. En outre, l'émission caractéristique des hadrons (98% des rayons cosmiques) en rayons gamma a pu être prouvée dans deux restes de supernova avec les observations du satellite *Fermi* (Ackermann et al 2013, *Science* 339, 807). En revanche on ne mesure pas bien l'efficacité du processus d'accélération. Plusieurs modèles physiques existent pour expliquer les distributions en énergie observées dans les restes de supernova assez âgés qui présentent une cassure vers quelques GeV. Cette cassure reflète probablement l'énergie à laquelle les rayons cosmiques « sortent » des restes de supernova, même si des explications concurrentes existent. Dans les



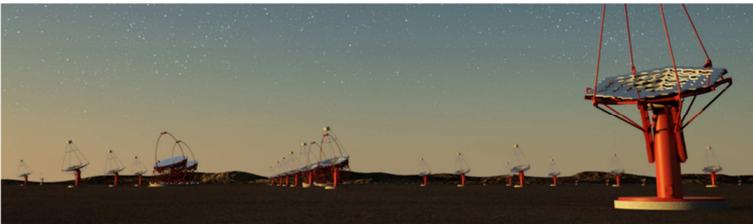
Les *dentelles du cygne*, reste de supernova (SNR G074.0-08.6) vu en optique, à gauche, et par le télescope Fermi à droite (les courbes vertes sont les contours d'intensité en rayons X obtenus par le satellite Rosat).

Cette cassure reflète probablement l'énergie à laquelle les rayons cosmiques « sortent » des restes de supernova, même si des explications concurrentes existent. Dans les

restes de supernova plus jeunes, le spectre se poursuit sans cassure jusqu'au TeV. C'est donc dans ces phases jeunes que l'énergie maximale des particules est atteinte.

Le travail de thèse comporte plusieurs volets :

- Une vingtaine d'articles a déjà été publiée sur les restes de supernova individuels détectés avec Fermi. La thèse permettra de participer à ce genre d'études détaillées en modélisant quelques restes de supernova brillants détectés par Fermi et au TeV par les télescopes Tcherenkov, en s'appuyant sur les observations en ondes radio et en rayons X.
- L'étudiant participera également à l'identification de restes de supernova parmi les sources galactiques non identifiées – c'est-à-dire dont la nature n'est pas avérée – afin d'augmenter la population et de mieux contraindre les propriétés moyennes des sources de rayons cosmiques. La difficulté vient de la possible confusion dans les régions actives de formation d'étoiles qui abritent aussi des pulsars, des étoiles massives et des binaires X susceptibles d'émettre en rayons gamma. La mesure du spectre multi-longueurs d'onde des sources et leur adéquation avec les modèles d'émission des différents objets joue un rôle important dans la stratégie d'identification.
- En parallèle, l'étudiant cherchera à confronter la population de restes de supernova au GeV dans la Galaxie avec les modèles théoriques : Il s'agira de simuler une population réaliste et de comparer leur nombre et leurs spectres avec les mesures effectuées à partir des données Fermi. Cette étude s'appuiera sur le code couplé d'accélération et d'évolution hydrodynamique développés dans l'équipe par Anne Decourchelle et Jean Ballet, et s'inspirera d'une étude complémentaire appliquée aux restes de supernova détectés par HESS (Cristofari et al 2013, MNRAS 434, 2748).
- L'expérience ainsi acquise permettra de prédire semi-quantitativement le potentiel de découverte de CTA, en particulier à très haute énergie et de sélectionner certaines sources aujourd'hui difficilement identifiées pour en faire la cible privilégiée de futures observations.



Vue d'artiste de l'observatoire CTA

Le travail se déroulera au sein de l'équipe haute énergie du Service d'astrophysique au CEA Saclay (site de l'Orme des merisiers). J. Ballet a la responsabilité de la production du catalogue de l'ensemble des sources de *Fermi* LAT. L'étudiant travaillera sur la partie galactique de ce relevé. Un premier catalogue d'une quarante

de restes de supernova est en cours de construction (Hewitt et al 2013, arXiv :1307.6570). Le travail s'intégrera dans le second catalogue, qui s'appuiera sur la nouvelle reconstruction des traces dans *Fermi*. Le télescope étant en opération depuis plusieurs années, l'étudiant pourra s'appuyer sur des logiciels existants pour l'analyse des données et sur l'expérience acquise dans le groupe. Il exploitera les résultats publiés par les télescopes Tcherenkov et en particulier le relevé du plan galactique par Hess. L'étudiant rejoindra également le consortium CTA, projet phare en astronomie gamma, et contribuera à affiner le potentiel de cet observatoire et son programme d'observations.

M2 recommandés

Astrophysique, astroparticules, plasmas

Date souhaitée

Septembre 2015 – Septembre 2018

Lieu de la thèse

IRFU-SAp, Laboratoire AIM, CEA Saclay, Orme des Merisiers, bât. 709, 91191 Gif-sur-Yvette

Pour en savoir plus

Fermi : <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>

CTA : <http://www.cta-observatory.org/>

Irfu : <http://irfu.cea.fr/>

SAP : <http://irfu.cea.fr/Sap/>