Table des matières

I Nom de la session **3**

Hélène LAFFON : *Etude des sources gamma dans le plan galactique avec H.E.S.S.* **5**

1.1 Introduction 5
1.2 Préambule 5
1.3 L'instrumentation Čerenkov 6
1.4 Amélioration de la résolution angulaire 7
1.5 Etude d'un reste de supernova : G22.7-0.2 7
1.6 Conclusion 8

Première partie

Nom de la session

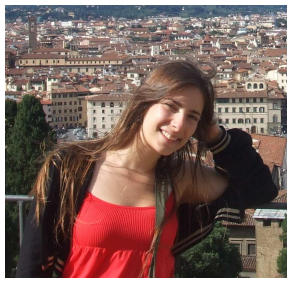


François
RABELAIS



Rabelais
FRANÇOIS

Etude des sources gamma dans le plan galactique avec H.E.S.S.



Hélène LAFFON
Laboratoire Leprince-Ringuet, Palaiseau

Résumé

L'étude du rayonnement gamma observé dans le plan galactique permet d'en apprendre davantage sur les caractéristiques des restes de supernovae et des nébuleuses à vent de pulsar. Cela peut aussi confirmer l'origine galactique d'une partie des mystérieux rayons cosmiques. Nous décrivons ici les différents processus d'accélération et d'émission à l'oeuvre dans ces objets, ainsi que les techniques de détection et d'analyse du rayonnement gamma à l'aide de télescopes à effet Čerenkov.

1.1 Introduction

A l'origine, l'astronomie gamma a pour but de sonder indirectement l'origine du rayonnement cosmique afin de comprendre où et comment les rayons cosmiques sont accélérés. Depuis une vingtaine d'années, l'instrumentation et les techniques de détection des observatoires Čerenkov ont fait des progrès considérables, et le nombre de sources gamma découvertes est passé de 10 en 2004 à 120 en 2010. Parmi ces sources, près des deux tiers sont galactiques, et pourraient expliquer l'origine des rayons cosmiques observés jusqu'à 10^{15} eV. Dans ce proceeding, nous passerons tout d'abord en revue quelques types de sources observables dans notre galaxie, puis nous décrirons les principaux mécanismes d'accélération des particules chargées ainsi que les processus d'émission en rayons gamma. Par la suite, nous expliquerons le principe de l'instrumentation Čerenkov et les méthodes d'analyse. Enfin, nous justifierons la nécessité d'améliorer la résolution angulaire et nous étudierons l'émission gamma observée sur un reste de supernova.

1.2 Préambule

1.2.1 Quelques sources galactiques

Au sein de notre galaxie, différents types d'objets constituent de potentiels accélérateurs de particules non thermiques. Les principales sources sur lesquelles nous nous focaliserons ici sont :

-Les restes de supernovae (SNR) : Lors de l'explosion d'une supernova, le plasma chaud de l'étoile est éjecté et va former une onde de choc avec le mileu interstellaire. Les particules chargées vont ensuite pouvoir être accélérées dans cette onde de choc. Selon les modèles théoriques, environ 10% de l'énergie initiale de la supernova serait disponible pour accélérer les rayons cosmiques. Ces objets ont généralement une morphologie en coquille observée en ondes radio, due à l'émission synchrotron des électrons accélérés dans l'onde de choc. En rayons gamma, ils peuvent présenter des morphologies diverses, dépendant de la répartition du milieu interstellaire environnant.

-Les pulsars et leurs nébuleuses : L'explosion d'une supernova conduit généralement à la création d'un objet compact, résidu de l'étoile mère. Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation rapide et présentant un très fort champ magnétique. Lorsque des particules chargées sont arrachées à la surface du pulsar, un vent de pulsar est créé et va "remplir" la nébuleuse, conduisant à une émission gamma observée à l'intérieur du reste de supernova.

-Les nuages moléculaires : Composés d'hydrogène ou de molécules plus complexes comme le ^{13}CO, ces objets ne sont pas des accélérateurs de particules chargées, mais leur cible. En effet, l'interaction des rayons cosmiques avec les molécules des nuages donne lieu à des processus hadroniques produisant des rayons gamma.

1.2.2 L'accélération de Fermi

Fermi 2^{eme} ordre :

L'accélération de particules chargées nécessite un champ électrique non nul, or le milieu interstellaire est globalement neutre. Cependant, en 1949, Fermi propose la théorie suivante [1] : lorsque les particules chargées entrent en collision avec des nuages magnétisés, celles-ci peuvent gagner de l'énergie petit à petit en multipliant les collisions frontales (dont la probabilité est légèrement plus grande que celle des collisions fuyantes) sur les inhomogénéités magnétiques. Le gain moyen en énergie correspondant est de : $< \frac{\Delta E}{E} >\sim \frac{4}{3}\beta^2$, où $\beta = v/c$ et v est la vitesse du nuage magnétisé.

Fermi 1^{er} ordre :

Ce mécanisme concerne quant à lui l'accélération par onde de choc, qui a lieu dans les restes de supernovae. Les particules traversent plusieurs fois le choc, en gagnant de l'énergie à chaque collision, et dans ce cas le gain moyen en énergie est du premier ordre : $< \frac{\Delta E}{E} >\sim \frac{4}{3}\beta$. Ce processus est donc beaucoup plus efficace que le précédent.

Ces deux processus conduisent à un spectre en loi de puissance, en accord avec le spectre observé des rayons cosmiques.

1.2.3 Processus d'émission gamma

Le spectre d'émission observé va dépendre de la nature des particules chargées (électrons/positrons ou hadrons).

Les processus leptoniques :

En présence d'un champ magnétique, les particules vont émettre un rayonnement synchrotron, observable de la radio au MeV. Elles sont aussi soumises au rayonnement de freinage (ou Bremsstrahlung) en présence de noyaux cibles dans les milieux environnants. De plus, elles vont intéragir par processus "Compton inverse" avec les photons diffus présents dans le milieu interstellaire (fond diffus cosmologique, fond infrarouge dû aux poussières, ou tout simplement la lumière des étoiles en optique) et propulser ces photons en rayons gammas en leur transmettant leur énergie. Enfin, le processus appelé "Synchro-Self Compton" consiste en une combinaison entre le rayonnement synchrotron et le "Compton inverse" : les leptons vont transmettre leur énergie aux photons du rayonnement synchrotron, les propulsant en rayons gammas.

Les processus hadroniques :

Dans le cas hadronique, le principal processus à l'oeuvre a lieu en présence de nuages moléculaires, composés également de hadrons, mais peu énergétiques. Les rayons cosmiques vont alors intéragir avec les particules du nuages et produire des pions neutres, qui se désintègrent ensuite en gammas : $pp \rightarrow \pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$.

Les modèles théoriques tenant compte des caractéristiques du milieu étudié (densité du rayonnement diffus ou des nuages moléculaires par exemple) prédisent le spectre observé dans toute la gamme de longueurs d'onde dans les cas leptoniques et hadroniques. La confrontation des observations réalisées par divers instruments à différentes longueurs d'onde avec ces modèles peut ensuite permettre de trancher entre les deux types de processus et de remonter à la nature des particules primaires. Cependant, cette distinction s'avère généralement difficile car des modèles hybrides complexes sont aussi possibles, et souvent plus vraisemblables que les modèles simplistes.

1.3 L'instrumentation Čerenkov

1.3.1 Principe de la détection

En arrivant dans l'atmosphère, les rayons gamma vont créer une gerbe électromagnétique et déposer leur énergie comme dans un calorimètre. Les particules secondaires de la gerbe vont ensuite créer un flash Čerenkov, d'une durée inférieure à 10 ns dans la gamme de fonctionnement de H.E.S.S. [1]. C'est cette lumière Čerenkov qui sera détectée par les télescopes. Pour ce faire, les télescopes ont une structure particulière : ils disposent d'une surface de miroirs qui vont renvoyer la lumière Čerenkov vers une caméra constituée de photomultiplicateurs. L'électronique utilisée doit être très rapide, afin de pouvoir détecter le flash très bref. Ainsi, l'image de la gerbe va être reproduite sur la caméra à travers son émission Čerenkov. Les gerbes éléctromagnétiques sont régulières et symétriques par rapport à l'axe de propagation, leur image sur la caméra va donc avoir une forme elliptique, contrairement aux gerbes hadroniques créées par les rayons cosmiques et qui constituent le principal bruit de fond. De plus, la plupart des observatoires Čerenkov disposent de plusieurs télescopes, cette image va donc être observée en stéréoscopie, c'est à dire qu'on va la voir sous plusieurs angles. Ainsi, on pourra remonter plus facilement à la direction du gamma incident, qui se situe le long de l'axe de la gerbe, donc le long du grand axe de l'ellipse. Avec plusieurs images, la direction du gamma incident correspond donc à l'intersection des axes des ellipses.

1.3.2 Déroulement de l'analyse

Nettoyage des images et pré-coupures.

On applique un système de "double seuil" aux pixels et à leurs plus proches voisins afin d'éliminer les pixels isolés et de conserver les "amas" correspondants aux images de la gerbe et sur lesquels on calcule des moments du second ordre. On utilise ensuite des coupures d'intensité minimale et de distance entre le centre de gravité des images et le centre de la caméra afin de garder uniquement de bons candidats potentiels pour la reconstruction (images bien visibles et non tronquées).

Reconstruction.

La reconstruction consiste à calculer des paramètres intrinsèques des événements (hauteur du maximum de gerbe, paramètre d'impact [2],...) afin de remonter à la direction et à l'énergie du gamma incident. Il existe plusieurs méthodes de reconstruction [3], chacune ayant ses caractéristiques propres. La plus ancienne, dite de *Hillas*, est basée sur des moments du second ordre, les paramètres de Hillas des images sur les caméras : longueur et largeur de l'image, distance entre la direction reconstruite et la direction réelle de la source (notée θ^2), etc. Cette méthode prend en compte uniquement des paramètres simplifiés de l'image mais elle a fait ses preuves dans l'efficacité de la discrimination du bruit de fond constitué par les hadrons [2] et de part la rapidité de son algorithme. Une autre méthode développée plus récemment, appelée *Model3D*, considère une ellipsoïde de révolution à partir de laquelle sont émis les photons Čerenkov. Elle prédit ensuite les images sur les caméras en fonction de paramètres intrinsèques de la gerbe (largeur et hauteur du maximum de gerbe, ...) et compare ces prédictions aux images observées. Elle utilise toute l'information donnée dans les images et est basée sur un fit de maximum de vraisemblance, ce qui prend malheureusement plus de temps de calcul.

Création de cartes et de spectres.

En sommant toutes les directions de gamma incidents dans un champ de vue donné, on obtient des cartes du ciel. Deux types de cartes sont importantes : les cartes d'excès vont permettre d'étudier la morphologie des sources et les cartes de significativité nous assurent

[1] High Energy Stereoscopic System

[2] Distance entre l'impact de la gerbe au sol et le centre du réseau de télescopes.

que ces sources ne sont pas des fluctuations du fond. On définit pour cela une région On où l'on observe un signal, et une ou plusieurs régions Off dans lesquelles on supppose qu'il n'y a pas de signal. On calcule ensuite l'excès comme : $Exc = N_{On} - \alpha N_{Off}$, où N_{On} et N_{Off} sont le nombre d'événements dans les régions On et Off, et α correspond aux rapport des surfaces entre les régions. Ceci permet de nous affranchir du bruit de fond des électrons cosmiques, indiscernables des rayons gammas car ils forment eux aussi des gerbes électromagnétiques. La création de spectres sur une source donnée permet quant à elle de comparer les flux observés aux prédictions des modèles théoriques.

1.4 Amélioration de la résolution angulaire

La résolution angulaire est définie à partir de la distribution du θ^2, paramètre de Hillas correspondant à la distance entre la source réelle et sa direction reconstruite. On définit donc la résolution angulaire par le R_{68}, correspondant à 68% de cette distribution. Pourquoi améliorer la résolution ? L'expérience H.E.S.S. fonctionne depuis 2004 et les sources les plus brillantes ont d'ores et déjà été détectées. Cependant, avec une meilleure résolution angulaire, ces sources pourront être ré-analysées plus finement, au niveau de leur morphologie par exemple. De plus, cela pourrait permettre de découvrir de nouvelles sources plus faibles non encore détectées. Les différentes méthodes de reconstruction étant sensibles à différents paramètres et fluctuations, elles peuvent donner une meilleure résolution angulaire pour certains jeux de paramètres donnés. C'est donc autour de cette idée que j'ai tenté d'améliorer la résolution avec les méthodes déjà existantes.

1ère étape : simulations

On utilise des simulations de gerbes électromagnétiques à différentes efficacités optiques [3], angles zénithaux et offsets (distance entre la direction de la source et le centre de la caméra). Pour chaque simulation, on reconstruit les événements avec les deux méthodes décrites précédemment ($Hillas$ et $Model3D$), on applique ensuite un jeu de coupures donné (intensité, largeur de l'image, ...) et on calcule le R_{68} correspondant pour chaque méthode en fonction de la hauteur du maximum de gerbe $Hmax$ et de la multiplicité des télescopes. On définit ensuite la variable $Kappa$:

$$\kappa = \frac{2(R_{68}(M3D) - R_{68}(Hillas))}{R_{68}(M3D) + R_{68}(Hillas)} \qquad (1.1)$$

et on crée des tables de κ lissées en fonction de $Hmax$ pour toutes les configurations disponibles [efficacité optique, angle zénithal, offset] et pour différentes multiplicités. Ces tables de κ lissées constituent un opérateur binaire, c'est à dire qu'elles indiquent seulement quelle méthode obtient la meilleure résolution dans la configuration donnée : si $\kappa > 0$, c'est la reconstruction $Hillas$ qui a une meilleure résolution et inversement, si $\kappa < 0$, c'est $Model3D$.

2ème étape : utilisation des tables

En fonction des paramètres des événements mesurés (ou simulés), on va regarder les tables correspondantes indiquant quelle méthode de reconstruction utiliser. Avec cet algorithme de choix, pour la configuration (efficactité optique=70%, offset=1.5°) et avec des coupures optimisées pour des sources assez fortes, on obtient une amélioration de 10% de la résolution angulaire moyennée sur tous les angles zénithaux.

Ces résultats sont donc prometteurs, mais il reste cependant à appliquer cet algorithme sur des données réelles afin de vérifier l'amélioration attendue.

1.5 Etude d'un reste de supernova : G22.7-0.2

Après avoir passé en revue tous ces détails techniques, faisons un peu d'analyse de données. Il existe des catalogues recensant différents types d'objets, comme le catalogue de Green, qui compte 274 restes de supernovae (SNRs) observés dans différentes longueurs d'onde. Les SNRs sont de bons candidats accélérateurs de rayons cosmiques, comme nous l'avons vu précédemment. Or, nos observations de SNRs n'ont pas pu déterminer de facon univoque la nature des particules accélérées dans ces objets. C'est pourquoi il est intéressant d'étudier de manière approfondie les SNRs émettant en gamma.

Le reste de supernova G22.7-0.2 présente une coquille en radio, de 26 arcmins de diamètre, et est situé juste à côté d'un autre SNR : G23.3-0.3, plus connu sous le nom de W41. Comme on le voit sur la figure 1.1, W41 est étendu et très brillant en gamma, alors que l'émission gamma observée sur G22.7-0.2 est localisée sur le bord nord-est de la coquille (a). Un excès peu significatif est également observé près du bord sud (b).

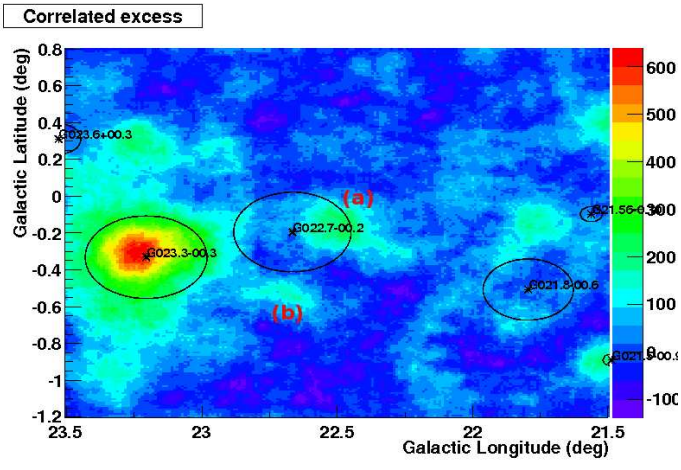


FIG. 1.1 – Carte d'excès vu par H.E.S.S. en coordonnées glactiques. En noir : les SNRs du catalogue de Green.

Jusqu'à présent, aucune observation n'a permis de

[3] L'efficacité optique dépend de la réflectivité des miroirs et de l'efficacité des PMTs, elle diminue au cours du temps et est donc définie par rapport à l'efficacité optique initiale de l'instrument.

déterminer à quelle distance se trouve G22.7-0.2, mais on connait la distance de W41, qui est d'environ 4.2 kpc. De plus, les observations infrarouge montrent une probable zone d'interaction entre les deux SNRs (cavité H_{II} excité par les chocs créés lors de l'expansion des SNRs) [4]. Il semblerait donc que les deux SNRs soient assez proches l'un de l'autre.

Enfin, comme le montre la figure 1.2, les nuages moléculaires de ^{13}CO mesurés à 76 $km.s^{-1}$ sont coïncidents avec les excès (a) et (b) observés en gamma autour du reste de supernova G22.7-0.2. Or, d'après les courbes de rotation de notre galaxie [5], cette vitesse peut correspondre à deux distances possibles : 4.8 kpc ou 10.5 kpc. Dans l'hypothèse de l'interaction entre les deux SNRs, la première distance de 4.8 kpc semble donc la plus probable, et c'est celle-ci que nous utiliserons par la suite.

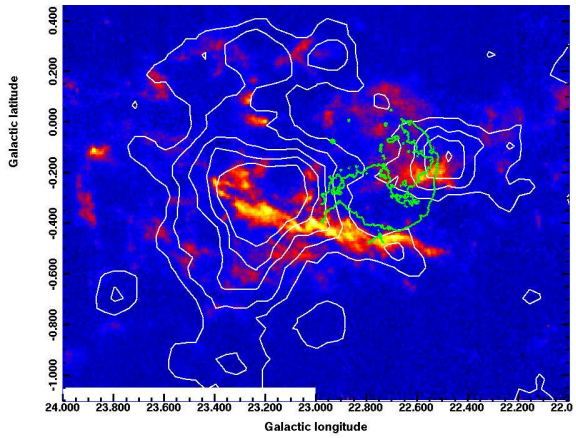


FIG. 1.2 – Données ^{13}CO du Galactic Plane Survey (BU-FCRAO) à 76 $km.s^{-1}$. En blanc : contours de la carte d'excès de H.E.S.S., en vert : le SNR G22.7-0.2 observé en radio par les télescopes de VLA.

Comme il n'y a aucun pulsar détecté dans ce reste de supernova susceptible de fournir l'énergie nécessaire à l'accélération des particules chargées, une hypothèse possible pour expliquer l'émission gamma observée serait celle de l'accélération de rayons cosmiques dans l'onde de choc du SNR. En s'échappant du reste de supernova, ces derniers auraient intéragi dans les nuages moléculaires de ^{13}CO environnants et donné lieu à l'émission gamma observée par production de pions neutres.

A l'aide des données ^{13}CO et en supposant que les nuages sont à une distance de 4.8 kpc, on peut estimer leur densité n [7]. Dans l'hypothèse des rayons cosmiques accélérés dans le SNR interagissant avec ces nuages de densité n, le flux gamma F_γ attendu au dessus d'une énergie E_0 et pour un spectre en loi de puissance d'indice 2.1 est donné par [6] :

$$F_\gamma(E > E_0) \approx 9 \times 10^{-11}\ \theta\ \left(\frac{E_0}{1TeV}\right)^{-1.1}\left(\frac{E_{SN}}{10^{51}erg}\right) \times\left(\frac{d}{1kpc}\right)^{-2}\left(\frac{n}{1cm^{-3}}\right)\ cm^{-2}s^{-1} \quad (1.2)$$

où θ est la fraction de l'énergie E_{SN} de l'explosion de la supernova disponible pour l'accélération des cosmiques et d la distance mesurée du SNR. Connaissant le flux gamma observé au-dessus de $E_0 = 1\ TeV$ et en prenant $E_{SN} = 10^{51}\ erg$, on peut remonter à la fraction d'énergie θ de la supernova nécessaire pour accélérer les rayons cosmiques afin d'expliquer l'émission gamma observée

On obtient ainsi une valeur de $\theta \simeq 4\%$ de l'énergie de la supernova nécessaire à l'accélération des rayons cosmiques, ce qui est tout à fait en accord avec la fraction de 10% habituellement utilisée dans les modèles théoriques. L'hypothèse d'accélération des rayons cosmiques dans ce reste de supernova semble donc vraisemblable.

1.6 Conclusion

Mes travaux sur l'amélioration de la résolution angulaire semblent prometteurs et pourraient permettre de réaliser des études morphologiques plus fines sur des sources déjà connues et peut-être de découvrir de nouvelles sources plus faibles. Concernant le reste de supernova G22.7-0.2, l'hypothèse de l'accélération de rayons cosmiques interagissant avec les nuages environnants semble vraisemblable, il reste à présent à réaliser un spectre dans toute la gamme de longueurs d'onde afin de tester si un modèle hadronique peut expliquer les flux observés.

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble des organisateurs et coordinateurs pour leur bonne humeur et leur disponibilité ainsi que tous les participants à ces JJC 2010. Une petite pensée émue également pour les chansons de J-S, la playlist de Pedro, l'inventeur du Cointreau, les blagues belges et les histoires de québécois !

Références

[1] E. Fermi, et al., Phys. Rev. 75, 1169 (1949)

[2] A. M. Hillas, Čerenkov light images of EAS produced by primary gamma rays and by nuclei, proceedings de la 19ème conférence ICRC (1985)

[3] M. de Naurois, Analysis methods for atmospheric Čerenkov Telescopes, Astro-ph (2006)

[4] W. T. Reach et al., A Spitzer Space Telescope infrared survey of supernovae remnants in the inner galaxy, Astronomical Journal (2006)

[5] D. P. Clemens et al., Massachusetts-Stony Brook Galactic Plane CO Survey : The galactic disk rotation curve, ApJ (1985)

[6] L. Drury, F. Aharonian, H. Voelk, The gamma-ray visibility of supernova remnants, A&A (1993)

[7] R. Simon et al., The structure of four molecular cloud complexes in the BU-FCRAO Milky Way Galactic Ring Survey, ApJ (2001)