

Table des matières

I	Nom de la session	3
	Armand FIASSON : <i>Observations de sources étendues avec H.E.S.S.</i>	5
1.1	Introduction	5
1.2	L'astronomie gamma de très haute énergie	5
1.3	L'imagerie Tcherenkov	5
1.4	L'expérience H.E.S.S.	6
1.5	Un reste de supernova : RX J1713.7-394	6
1.6	Le centre galactique	7
1.7	Conclusion	8

Première partie

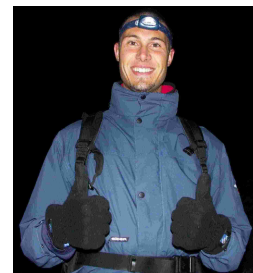
Nom de la session



François
RABELAIS



Rabelais
FRANÇOIS



Résumé

1.1 Introduction

L'expérience H.E.S.S. a pour objectif l'étude de photons gamma de très haute énergie allant de 100 GeV à 100 TeV. Cette expérience est la plus sensible en fonctionnement dans ce domaine en énergie. La statistique accumulée depuis la fin de sa construction en décembre 2003 a permis de mettre en évidence 33 nouvelles sources à ce jour (17 sources avaient été détectées avant H.E.S.S. dont 6 confirmées) et permet d'observer des sources plus faibles et diffuses de rayons gamma. Un des objectifs de l'expérience est l'observation de restes de supernovae. La précision angulaire de l'instrument permet d'obtenir de images résolues de ces objets et d'apporter des réponses à l'énigme de l'accélération des rayons cosmiques à l'intérieur de notre galaxie.

1.2 L'astronomie gamma de très haute énergie

L'astronomie gamma traite de photons gamma de très haute énergie aux limites du spectre électromagnétique. Ils sont produits par l'interaction de particules ultra-relativistes avec le milieu environnant selon plusieurs mécanismes. D'une part le processus inverse Compton, qui consiste en la diffusion élastique d'un électron ultra-énergétique sur un photon du milieu ambiant (fond cosmologique, fond infrarouge, étoile proche). Un e^- de 10 TeV et au delà peut aussi émettre un gamma au TeV par rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung dans le champ d'un noyau du milieu ambiant. Les protons et noyaux accélérés interagissent eux aussi avec le milieu ambiant. Les pions neutres des gerbes de particules résultantes se désintègrent en deux gammas de haute énergie. Les photons n'étant pas déviés par le champ magnétique galactique et extragalactique, leur direction de propagation pointe directement sur leur origine. Ils sont de ce fait particulièrement intéressants pour élucider l'origine des rayons cosmiques galactiques d'énergie inférieures à 10^3 TeV. Dans la gamme du TeV, les flux sont extrêmement faibles, de l'ordre de $10 \gamma \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Les surfaces de collection des satellites de l'ordre du m^2 limitent leur sensibilité à des énergies de l'ordre de 100 GeV (cf. Sylvain Guiriec). La technique d'observation au sol a été développée pour permettre l'observation de gammas à plus haute énergie.

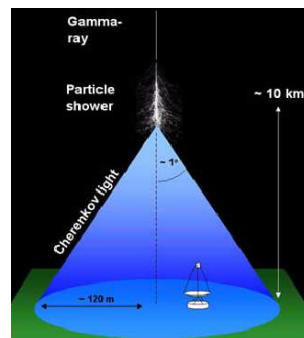


FIG. 1.1 – Observation indirecte au sol d'une gerbe atmosphérique. La lumière Tcherenkov d'une gerbe se développant typiquement autour de 10 km d'altitude, s'étale au sol sur une distance de l'ordre de la centaine de mètres.

1.3 L'imagerie Tcherenkov

Le bouclier de l'atmosphère correspondant à 28 longueurs de radiation pour un γ , rend impossible toute détection directe au sol. Seule l'observation de la gerbe de particules secondaires initiée par l'interaction du γ dans l'atmosphère est possible. Le photon gamma incident, en interagissant avec le champ coulombien d'un noyau, va créer une paire $e^+ e^-$. Ces deux particules vont alors engendrer une cascade de particules secondaires via le rayonnement Bremsstrahlung pour les électrons et positons et la création de paires pour les photons. Le maximum de développement de la gerbe se situe vers 10 km d'altitude et le développement de la gerbe se prolonge jusqu'à son absorption par l'atmosphère. Les particules secondaires (e^- et e^+) voyageant plus rapidement que la lumière dans l'atmosphère vont rayonner de la lumière Tcherenkov observable au niveau du sol. L'angle d'émission Tcherenkov étant de l'ordre de 10 mrad, le cône de lumière illumine une zone d'une centaine de mètres de rayon (fig. 1.1). Deux techniques d'observation sont utilisées pour analyser la lumière Tcherenkov recueillie au sol : l'imagerie ou l'échantillonnage. L'échantillonnage consiste à récupérer le maximum de lumière au sol afin d'estimer l'énergie, la direction d'origine de la particule incidente. L'expérience CELESTE dans les Pyrénées Orientales, utilisait ce procédé jusqu'en juin 2004 [1]. L'autre technique, utilisée par H.E.S.S., consiste à obtenir une image du développement de la gerbe dont on pourra extraire des informations sur l'énergie du rayon gamma et sur sa direc-

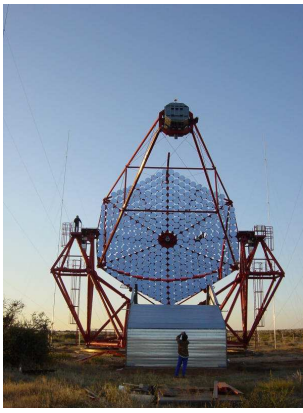


FIG. 1.2 – *Un des quatre télescopes de H.E.S.S.*

tion de propagation. Elle est particulièrement intéressante dans le cadre du rejet du bruit de fond, les gerbes atmosphériques de particules chargées, beaucoup plus nombreuses. Une simple comparaison d'ordres de grandeur illustre à merveille le défi de l'astronomie gamma qu'est le rejet du bruit de fond hadronique. Le flux typique de gamma détectés par H.E.S.S. est de l'ordre du gamma par minute alors que le déclenchement du télescope par les hadrons est de l'ordre de la centaine de hertz.

Une gerbe issue d'un photon gamma est dominée par les interactions électromagnétiques. Le développement latéral de la gerbe est de ce fait limité et relativement isotrope dans le plan transverse. Cette symétrie de développement de la gerbe est conservée dans l'émission Tcherenkov et dans l'image que l'on obtient. Les gerbes de hadrons font intervenir l'interaction forte et ne présente généralement plus de symétrie dans leur développement. Les images obtenues sont plus éparpillées et moins symétriques que les gerbes électromagnétiques. La majeure partie du fond hadronique peut ainsi être statistiquement écartée. Le signal gamma est finalement extrait en soustrayant à la zone ON analysée le signal d'une zone OFF dont les conditions d'acceptance sont identiques dans le champ de vue.

1.4 L'expérience H.E.S.S.

L'expérience H.E.S.S. est un réseau d'imageurs Tcherenkov implanté en Namibie, sur le plateau de Khomas, à 1800 m d'altitude. Le choix du site est lié d'une part à la qualité d'observation (très faible pollution lumineuse, conditions atmosphériques favorables) et d'autre part à son exposition. Le ciel de l'hémisphère sud, incluant le centre galactique et une grande partie du plan de la galaxie est extrêmement riche en sources de rayons gamma.

Le télescope est un instrument de troisième génération qui combine différentes techniques mises au point lors des générations précédentes. Il additionne une grande surface de collection mise en place par l'expérience Whipple (gain de sensibilité), la stéréoscopie de l'expérience HEGRA (meilleur rejet du bruit de fond et

meilleure précision angulaire) et une électronique rapide au sein d'une caméra finement pixellisée, tel que pour l'expérience française CAT (réduction du temps mort et gain de précision sur les caractéristiques de la gerbe). Le dispositif consiste en quatre télescopes disposés sur un carré de 120 m de côté (fig 1.2). Les réflecteurs des télescopes, de 13 m de diamètre, sont composés chacun de 380 miroirs paraboliques disposés sur un montage Davies-Cotton. Ce système permet de minimiser l'aberration de coma des miroirs tout en conservant une faible dispersion en temps du signal. Ce réflecteur focalise la lumière Tcherenkov sur une caméra à grand champ de vue (5°) située à son foyer. Cette caméra est composée de 960 photomultiplicateurs prolongés par des cônes de Winston, limitant le champ de vue d'un pixel à 0.16° . L'ensemble de l'électronique est contenu dans la caméra, permettant de réduire le temps mort de déclenchement du système et de lecture des signaux.

La combinaison de ces différentes caractéristiques permet d'obtenir une résolution en énergie de l'ordre de 10% à 1 TeV et une résolution angulaire inférieure à 0.1° [2]. La grande surface de collection permet d'être sensible à des flux de l'ordre du pourcent du flux provenant de la Nébuleuse du Crabe, la chandelle standard de l'astronomie gamma en 100h. Une telle sensibilité combinée à une faible résolution angulaire, permet de mettre en évidence des sources faibles étendues, contrairement aux expériences précédentes.

1.5 Un reste de supernova : RX J1713.7-394

La bonne résolution angulaire de H.E.S.S. a permis de résoudre plusieurs types de restes de supernovae en coquille. La figure 1.3 montre RX J1713.7-3946, le plus brillant de ces objets résolus. On distingue nettement en rayons gamma la coquille du reste de supernova. Des zones plus brillantes sont visibles sur la partie est. Une étude de la répartition de matière dans le milieu environnant le reste de supernova montre que les zones les plus brillantes en photons gamma correspondent aux zones de matières les plus denses balayées par les éjectats du reste de supernovae.

Or les restes de supernovae sont les candidats les plus probables à l'accélération de hadrons dans la galaxie. Seul 10% d'efficacité de conversion de l'énergie d'explosion des supernovae (10^{51} erg soit 10^{44} J) au sein de la galaxie serait suffisant pour reproduire le flux de hadrons observé au niveau du système solaire. Le mécanisme de Fermi prédit en effet que le passage répété de particules au niveau d'onde de chocs (produite par interaction des éjectats d'une supernova sur le milieu environnant par exemple) permet l'accélération de ces particules et prédit un spectre en énergie en loi de puissance.

Dans le cas de RX J1713.7-3946, la corrélation entre émission gamma et densité de matière environnante signe incontestablement l'accélération de particules au niveau du choc et leur interaction dans le milieu am-

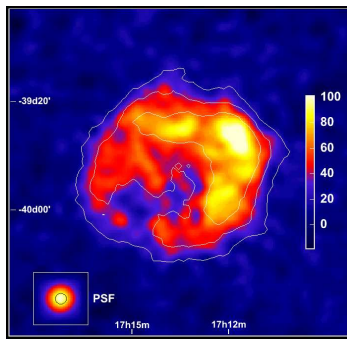


FIG. 1.3 – Carte d'excès d'événements vue par H.E.S.S. du reste de supernova en coquille RX J1713.7-394.

biante par les processus déjà cités. Par ailleurs, le spectre en énergie observé est compatible avec celui d'une population de photons gamma issus d'interaction de particules accélérées par mécanisme de Fermi. La nature des particules accélérées est incertaine. Différentes modélisations d'électrons et protons accélérés ont été réalisées pour expliquer le flux observé dans la gamme en énergie de H.E.S.S.. Dans le cas d'électrons accélérés, les observations en rayons X permettent d'apporter des contraintes supplémentaires sur leur spectre en énergie. Le passage répété des particules chargées au sein de l'onde de choc n'est possible que si un champ magnétique suffisamment intense les confine dans cette zone. Les électrons accélérés, sous l'action de ce champ magnétique, vont alors émettre du rayonnement synchrotron principalement dans la gamme des rayons X. La figure 1.4 est une modélisation de l'émission électromagnétique du reste de supernova ajustée à partir des données X (ASCA) et radio (ATCA - limite inférieure du spectre synchrotron) pour différentes valeurs de champ magnétique. On voit que les données observées avec H.E.S.S. sont compatibles avec un modèle d'électrons accélérés. Une autre modélisation a été réalisée dans le cas de l'accélération de hadrons. La figure 1.5 représente cette modélisation. Ici aussi, le spectre en énergie des données H.E.S.S. est tout à fait compatible avec une population de hadrons accélérés. A partir des estimations de densité de matière faite à d'autres longueurs d'ondes et du flux de gamma observé, on peut calculer la densité énergétique des hadrons accélérés par le reste de supernova. Dans le cadre de la modélisation réalisée, la densité impliquée est elle aussi tout à fait compatible avec les 10% attendus de conversion de l'énergie cinétique en rayons cosmiques. On s'aperçoit en regardant les figures 1.4 et 1.5 que l'observation de cet objet à plus faible énergie (gamme du GeV) permettra d'apporter la réponse définitive quand à la nature des particules accélérées. Le spectre en énergie impliqué par les deux modèles dans cette gamme sont en effet très différents. Alors que le spectre en E^2 attendu pour les électrons doit présenter un cut-off en deçà de 100 GeV, dans le cas de hadrons, le spectre doit être plus plat.

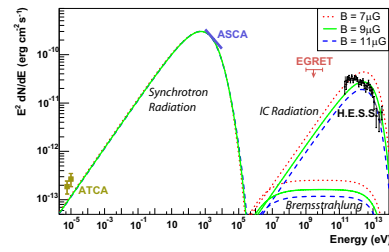


FIG. 1.4 – Modélisation de l'émission gamma provenant de RX J1713.7-394 pour un scénario leptonique. Additionnellement au spectre observé par H.E.S.S., sont représentés les observations en rayons X (ASCA) et radio (ATCA) faites sur cet objet.

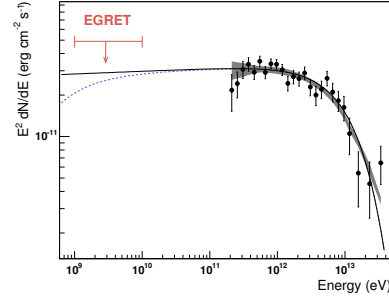


FIG. 1.5 – Modélisation de l'émission gamma provenant de RX J1713.7-394 pour un scénario hadronique.

1.6 Le centre galactique

Le centre galactique est une région riche pour l'astrophysique des hautes énergies. Outre la possible présence de matière noire concentrée au centre de notre galaxie, dont l'annihilation produirait des γ de haute énergie, un certain nombre d'accélérateurs potentiels de rayons cosmiques sont répartis dans une région de quelques degrés autour du centre de la galaxie. La galaxie possède, comme une grande majorité des galaxies, un trou noir actif en son centre susceptible d'accélérer des rayons cosmiques. Un complexe de nuages moléculaires géants est aussi situé à proximité du centre de la galaxie et offre une cible idéale pour les rayons cosmiques accélérés. H.E.S.S. a observé cette région ces trois dernières années. Deux sources ponctuelles ont été rapidement détectées, H.E.S.S. J1745-290, dont la position semble coïncider avec le trou noir Sagittarius A* [5], et H.E.S.S. J1747-281, une source plus faible engendrée par les électrons accélérés par le pulsar du reste de supernovae composite G0.9+0.1 [4]. Ces deux sources sont visibles sur la figure 1.6(a). L'exposition prolongée sur cette zone a permis dans un second temps de faire apparaître une émission diffuse le long du plan galactique [6]. Les deux sources fortes ponctuelles ont été soustraites (figure 1.6(b)) et l'émission diffuse apparaît alors nettement autour du centre galactique. Les contours d'émission de la raie radio du CS sont superposés sur la carte. L'hydrogène moléculaire H_2 ne rayonnant pas, on utilise la raie du CS pour cartographier les nuages moléculaires denses dans la galaxie. La

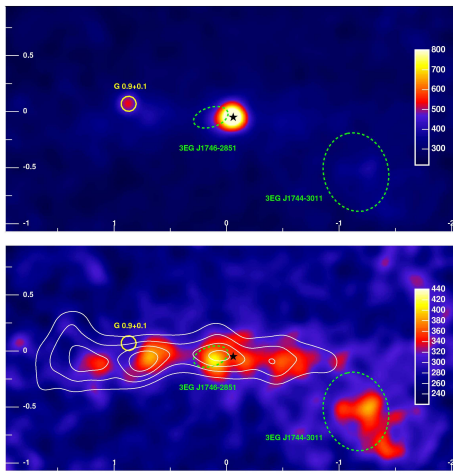


FIG. 1.6 – (a) Carte d’excès du centre galactique observé par H.E.S.S.. (b) Les deux sources ponctuelles ont été soustraites (Sag A* et G0.9+0.1).

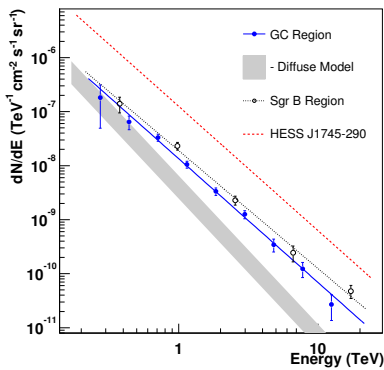


FIG. 1.7 – Spectre en énergie des rayons gamma observés sur l’ensemble de la région (bleu). Pour comparaison, sont donnés le spectre attendu d’une émission diffuse non associée à un accélérateur particulier (bande grise), le flux observé provenant de Sag A* (H.E.S.S. J1745-290) et celui d’une des régions les plus brillantes de l’émission diffuse (Sag B).

corrélation entre la quantité de matière (l’intensité de la raie du CS) et l’émission γ observée par H.E.S.S. est flagrante. C’est la première fois qu’une telle corrélation est observée sur une si grande échelle dans la gamme d’énergie du TeV. Elle signe clairement l’interaction de rayons cosmiques dans ces nuages moléculaires géants comme étant l’origine des rayons gamma observés.

Le spectre en énergie des γ observés est une loi de puissance d’indice spectral $2.29 \pm 0.07_{stat} \pm 0.20_{sys}$ (figure 1.7). La bande grise est le flux attendu en rayon gamma en supposant que le flux de cosmiques au centre de la galaxie est le même que celui observé sur Terre. L’indice spectral observé est plus faible que celui prédit alors que sa normalisation est plus importante. Cette différence est comprise comme l’association du signal observé avec un accélérateur proche et récent. Le signal s’étend sur près de 3° et correspond au centre de la galaxie à une distance de 400 pc. Les électrons accélérés

perdent rapidement leur énergie, notamment par rayonnement synchrotron. Dans l’environnement du centre galactique, une dizaine d’accélérateurs d’électrons serait nécessaire pour expliquer l’extension spatiale du signal. Les protons ne souffrant pas de pertes synchrotron, un seul accélérateur pourrait être à l’origine de l’émission observée. La densité énergétique des protons accélérés est compatible avec la part d’énergie cinétique d’explosion susceptible d’être converti en rayons cosmiques au sein d’un reste de supernova. L’indice spectral plus faible est un argument supplémentaire en faveur d’un accélérateur récent de protons.

1.7 Conclusion

Le démarrage de H.E.S.S. fin 2003 a permis de doubler le nombre de sources de rayons gamma de haute énergie. L’exposition prolongée sur le plan galactique ouvre maintenant la possibilité d’étudier des sources faibles et étendues et rend accessible toute une nouvelle physique de ces objets par leur analyse morphologique. L’extension du signal diffus donne une première preuve indirecte de la présence d’un accélérateur de protons actif au centre de la galaxie. La découverte de nouvelles sources devrait permettre d’améliorer les contraintes apportées aux modèles d’accélération de particules au sein de la galaxie. La construction de la seconde phase de H.E.S.S. (ajout d’un cinquième détecteur de 28 m de diamètre prévu en 2008) permettra de descendre le seuil en énergie et d’apporter de nouveaux éléments pour résoudre le mystère de l’origine des rayons cosmiques.

Remerciements

Ce fut une semaine particulièrement intéressante, c’est pourquoi c’est un plaisir de remercier les coordinateurs des différentes sessions sans oublier les gentils organisateurs !

Références

- [1] Thèse de Britto R. (2006)
- [2] Aharonian et al., A&A 457, 889 (2006)
- [3] Aharonian et al., A&A 449, 223 (2006)
- [4] Aharonian et al., A&A 432, L25 (2005)
- [5] Aharonian et al., A&A 425, L13 (2004)
- [6] Aharonian et al., Nature 439, 695 (2006)