

Nouvelles investigations sur l'origine des rayons cosmiques

1. L'expérience H.E.S.S.

Bernard Degrange

Laboratoire Leprince-Ringuet, École polytechnique et IN2P3/CNRS

H.E.S.S. est une expérience d'astrophysique internationale, installée en Namibie, dont l'objectif est d'étudier les sources de rayons cosmiques, par détection des photons γ (particules neutres et stables se propageant en ligne droite) d'énergie comprise entre 100 GeV et quelques dizaines de TeV. Elle comporte quatre grands télescopes, permettant la reconstruction stéréoscopique des gerbes formées par l'interaction d'une particule cosmique avec l'atmosphère, et de distinguer les gerbes électromagnétiques des gerbes hadroniques, plus larges et plus asymétriques. Les premiers résultats obtenus par H.E.S.S. au bout de deux ans de fonctionnement montrent que la sensibilité nécessaire est atteinte, et ont fourni des informations importantes : cartographie de la structure en coquille d'un vestige de supernova, observation de sources gamma dans la région centrale de la Galaxie, première détection dans ce domaine spectral d'un système binaire étoile-pulsar, observation de sources gamma intenses extra-galactiques (les « blazars »).

Enjeux astrophysiques et défis expérimentaux

Depuis la découverte du rayonnement cosmique par Victor Hess en 1913 [1], on sait que l'Univers est parcouru par des particules de haute énergie dont le spectre, manifestement non thermique, s'étend sur plus de 10 ordres de grandeur jusqu'à près de 10 joules (c.-à-d. $1,6 \cdot 10^{20}$ eV, cf. figure 1). Les processus d'accélération ou de production de ces « rayons cosmiques » et les objets astrophysiques qui en sont le siège représentent des thèmes importants de recherche à l'interface de l'astrophysique et de la physique des particules. Malheureusement, dans leur immense majorité, ces particules sont chargées électriquement et donc constamment déviées par les champs magnétiques irréguliers de notre Galaxie ; par suite, leurs directions à l'arrivée sur Terre ne nous fournissent aucune information directe sur leurs sources. Le flux de particules cosmiques en haut de l'atmosphère décroît très vite avec l'énergie comme le montre la figure 1.

Jusqu'à quelques TeV (10^{12} eV), les expériences embarquées en satellite ou en ballon qui disposent de surfaces effectives de l'ordre du m^2 , permettent de mesurer directement les abondances relatives des différents types de particules – des protons et des noyaux pour la plupart¹ – en fonction de l'énergie. Cependant, le flux de rayons cosmiques d'énergie supérieure à E décroît environ comme E^{-2} et, aux énergies supérieures à 100 TeV, on doit se contenter d'une mesure indirecte à partir du sol, en mettant à profit le développement de la grande gerbe de particules secondaires créée par l'interaction du rayon cosmique initial dans la haute atmosphère. Ces grandes gerbes atmosphériques (voir encadré 1) ont été mises en évidence en 1938 par Pierre Auger et ses collaborateurs [2].

Bien que l'étude, dans l'espace ou au sol, des rayons cosmiques chargés ne nous apporte que des informations indirectes sur les sources possibles, sur le plan théorique cependant, on a des idées précises sur les mécanismes d'accélération dans les plasmas astrophysiques. Le principe de base en a été développé par Fermi en 1949, mais la version moderne de ces processus ne met pas en jeu les mêmes conditions astrophysiques que celles envisagées initialement par Fermi. L'un d'eux est l'accélération par onde de choc en milieu diffu-

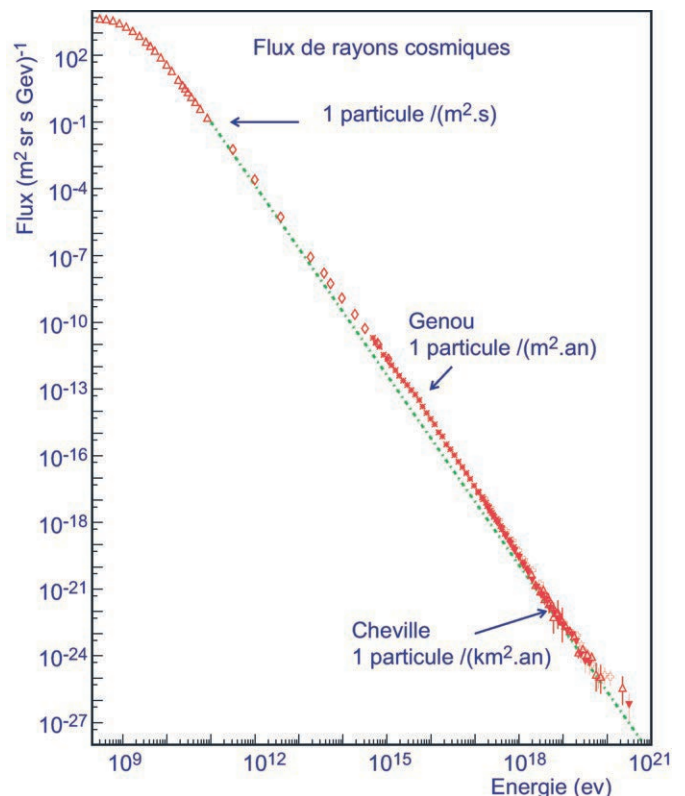


Figure 1 : Spectre en énergie des rayons cosmiques au-dessus de 1 GeV à leur arrivée sur Terre. La ligne en tirets verts présente un exemple de loi de puissance. L'indice spectral γ subit cependant deux modifications au moins : l'une à environ 4×10^{15} eV (le « genou ») et l'autre à environ 4×10^{19} eV (la « cheville »). (D'après Swordy, Université de Chicago).

sif : en présence d'un choc qui se propage dans le plasma interstellaire, une particule chargée, sans cesse déviée par les perturbations magnétiques (ondes d'Alfvén), peut franchir un grand nombre de fois dans les deux sens le front de choc. Comme les déviations magnétiques ne changent pas la vitesse de la particule par rapport au milieu ambiant, le milieu choqué se comporte par rapport au milieu calme comme une raquette avançant à grande vitesse et sur laquelle la particule rebondit en gagnant de l'énergie à chaque aller-retour. Les phénomènes violents produisant des ondes de choc sont donc les meilleurs candidats accélérateurs de rayons cosmiques : ainsi les explosions d'étoiles en supernovae produi-

¹ Une petite fraction des rayons cosmiques est constituée par des électrons et positrons dont le spectre est encore plus pentu que celui des protons et noyaux. Le rapport électron/proton vaut 0,83% à 10 GeV et 0,07% à 1 TeV.

sent des ondes de choc qui peuvent balayer le milieu interstellaire pendant des milliers d'années. Les éjections de matière à des vitesses relativistes peuvent aussi être des sources d'ondes de choc accélératrices : de tels jets sont observés dans des systèmes binaires de la Galaxie (ou « microquasars ») et dans les noyaux actifs de galaxie à forte émission radio. Les sursauts gamma, vraisemblablement dus à des explosions d'étoiles très massives, produisent également des jets relativistes. Comment caractériser les rôles respectifs de ces différents candidats dans le vaste domaine spectral allant de 10^9 à 10^{20} eV ? Comment expliquer les inflexions dans la pente du spectre des rayons cosmiques (figure 1) observées autour de 4×10^{15} eV (le « genou ») et de 4×10^{19} eV (la « cheville ») ? À partir de quelle énergie les sources extragalactiques contribuent-elles majoritairement ? Peut-on réellement rendre compte des énergies extrêmes supérieures au joule au moyen des mécanismes d'accélération de Fermi ?

Dès les années 1960, deux axes de recherche avaient été reconnus, mais ils mettaient l'un comme l'autre les physiciens face à des défis expérimentaux peu communs :

- Le premier axe de recherche, proposé par K. Greisen dès 1960 [3], consiste à détecter les particules cosmiques neutres et stables, certes très minoritaires, mais significatives du fait de leur propagation en ligne droite, et particulièrement les photons γ de haute énergie². Ces γ peuvent être produits à partir d'électrons (rayonnement synchrotron, effet Compton inverse³) ou, indirectement, à partir d'interactions de protons ou de noyaux, après désintégration des mésons π^0 qui en sont issus.
- Le second axe de recherche porte sur les rayons cosmiques d'énergies extrêmes pour lesquels le rayon de giration dans le champ magnétique local devient du même ordre de grandeur que le rayon de la Galaxie ; la direction d'arrivée de la particule cosmique garde alors une certaine mémoire de la direction originelle. Malheureusement, au-delà de 10^{19} eV, le flux est de l'ordre d'une particule par km^2 et par an et, si

la première gerbe géante a été observée en 1962, le nombre d'événements de ce type est resté trop limité jusqu'à maintenant pour qu'on puisse mettre clairement en évidence des anisotropies dans les directions d'arrivée.

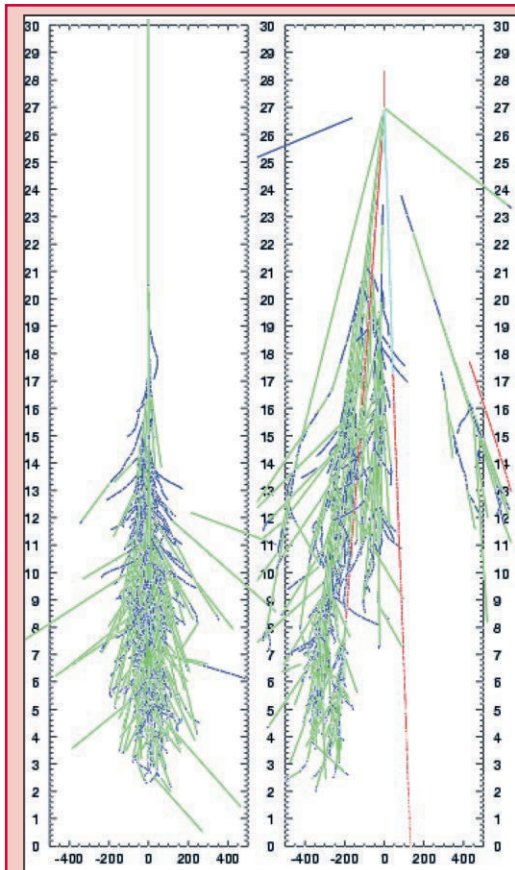
Ces défis sont aujourd'hui en passe d'être relevés dans deux domaines d'énergie très différents grâce à de nouvelles installations dont les noms font référence aux pionniers de l'étude des rayons cosmiques : l'expérience H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) qui détecte les photons γ au-dessus de 100 GeV, et l'observatoire Pierre Auger consacré aux rayons cosmiques d'énergies extrêmes. Ce dernier fera l'objet d'un prochain article et nous nous restreignons désormais ici à l'astronomie gamma de très haute énergie et à l'expérience H.E.S.S.

Les défis de l'astronomie gamma de très haute énergie

L'astronomie gamma en satellite commença dans les années 1970 avec les missions OSO-III, SAS-II et COS-B. Elle prit son essor avec le satellite Compton Gamma-Ray Observatory (1991-2000) qui comportait un détecteur de photons γ de haute énergie, EGRET. Toutefois, en raison de la rapide décroissance des flux de γ avec l'énergie, le domaine spectral de cet instrument, dont la surface effective était de $0,1 \text{ m}^2$, ne dépassait guère 20 GeV. Pour aller au-delà, force était de recourir aux expériences au sol mettant à profit l'atmosphère comme milieu de détection. En effet, un photon γ

2. L'astrophysique des neutrinos de haute énergie est aussi l'objectif d'importants projets d'expériences en cours de développement, notamment ANTARES en Méditerranée et Ice Cube au Pôle Sud.

3. L'effet Compton est dit « inverse » quand l'électron initial, très énergétique, interagit avec un photon mou pour lui communiquer une grande partie de son énergie ; l'effet Compton habituel en physique nucléaire est étudié dans le repère où l'électron initial est au repos.



Gerbes électromagnétiques

Lorsqu'un photon γ d'énergie bien supérieure au MeV pénètre dans un matériau, il interagit avec le champ coulombien d'un noyau pour créer une paire électron-positon. Ces particules subissent à leur tour l'action des champs coulombiens des noyaux d'atomes traversés et peuvent émettre des photons γ par rayonnement de freinage ; ceux-ci peuvent également créer des paires e^+e^- qui rayonneront d'autres photons et ainsi de suite. L'ensemble de ces particules secondaires constitue une gerbe électromagnétique. Le processus multiplicatif précédent cesse quand l'énergie des e^+ ou e^- tombe en dessous d'une valeur critique, car ils sont alors rapidement arrêtés dans le matériau (voir la figure). Dans l'atmosphère, pour des photons γ primaires verticaux de 1 TeV, le maximum de développement est atteint à environ 10 km d'altitude avec un millier de particules chargées. Les petites déviations constamment subies par les électrons et positons dans leurs interactions avec les atomes du milieu ont aussi pour effet d'élargir progressivement la gerbe au cours de son développement. Toutefois, en raison du grand nombre de particules secondaires et des faibles impulsions transverses mises en jeu dans les processus électromagnétiques, la distribution latérale moyenne garde une symétrie de révolution autour de la direction incidente. Cette propriété permet de distinguer une gerbe électromagnétique (cadre de gauche de la figure) d'une gerbe créée par un proton ou un noyau (ou gerbe hadronique, cadre de droite de la figure) dans laquelle les interactions nucléaires conditionnent une évolution beaucoup plus aléatoire où la symétrie de révolution est généralement perdue ; de plus, les gerbes hadroniques sont souvent plus larges du fait des impulsions transverses nettement plus grandes mises en jeu dans les interactions nucléaires.

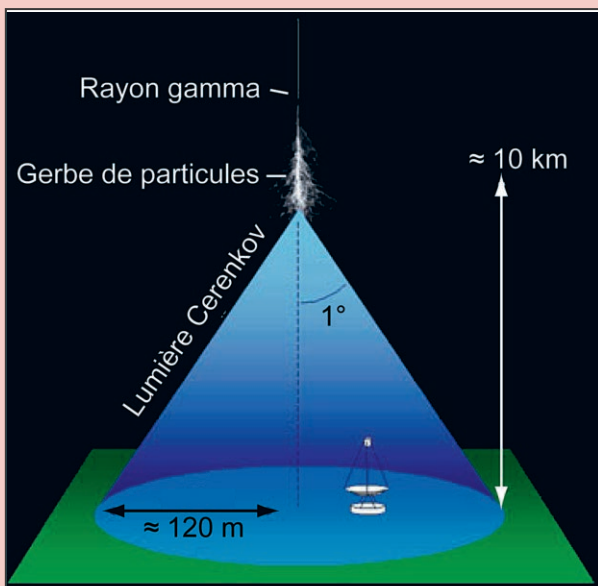
Développement de gerbes créées par une particule cosmique de 300 GeV dans l'atmosphère : à gauche gerbe électromagnétique produite par un photon γ ; à droite gerbe hadronique produite par un proton. La hauteur du cadre correspond à 30 km, sa largeur à $\pm 500 \text{ m}$. Les photons γ sont représentés en vert et les e^\pm en bleu. Les traces figurées en rouge atteignant le sol sont les muons issus des désintégrations des mésons π chargés.

de très haute énergie développe dans l'atmosphère une « gerbe électromagnétique » (voir encadré 1), c'est-à-dire une cascade de particules ultra-relativistes émettant de la lumière visible par effet Tcherenkov (voir encadré 2). Ce rayonnement, très collimaté le long de la gerbe, éclaire une surface au sol de l'ordre de quelques hectares. Un télescope placé dans cette zone et détectant cette lumière (ce qui exige de travailler la nuit en l'absence de lune) dispose d'emblée d'une grande surface effective, bien adaptée aux flux de γ de l'ordre du TeV. Cependant, s'il est facile de détecter le rayonnement Tcherenkov des gerbes cosmiques (les premiers essais datent des années 1960), son exploitation à des fins astronomiques a longtemps posé un problème très difficile aux physiciens : en effet, les rayons cosmiques chargés, de très loin les plus nombreux, engendrent aussi des particules émettant de la lumière Tcherenkov ; comment distinguer les très rares gerbes issues d'un γ de celles créées par un proton ou un noyau et appelées gerbes « hadroniques » (voir encadré 1) ?

La solution n'est apparue qu'à la fin des années 1980 : elle consiste à former l'image de la gerbe en lumière Tcherenkov dans le plan focal d'un télescope (télescope-imageur à effet Tcherenkov atmosphérique), à exploiter la forme de cette image et à reconstruire la direction incidente pour réduire le fond de rayons cosmiques de 2 à 4 ordres de grandeur. Une gerbe électromagnétique présentera en effet une image assez

Effet Tcherenkov

Lorsqu'une particule chargée traverse un matériau à une vitesse v supérieure à celle de la lumière c/n dans le milieu d'indice n , elle émet un rayonnement électromagnétique sur un cône axé sur la direction de la particule et de demi angle au sommet θ donné par $\cos \theta = c/(vn)$ dans l'atmosphère ; cet angle est de l'ordre du degré au niveau du sol. Le phénomène a été découvert en 1937 par les physiciens russes P. A. Tcherenkov et S. I. Vavilov. Dans une gerbe électromagnétique créée par un photon γ de très haute énergie, les électrons et positons produisent de la lumière Tcherenkov sur la plus grande partie de leur parcours. Du fait des petites déviations constamment subies par ces particules, les différents éléments de cônes lumineux finissent par éclairer plus ou moins uniformément toute une zone au sol qui peut atteindre plusieurs hectares (voir figure). Le phénomène ne dure que quelques nanosecondes.



Détection d'une gerbe atmosphérique par la lumière Tcherenkov émise. Le cône représenté a valeur symbolique : son angle d'ouverture n'est évidemment pas à l'échelle et la lumière est émise tout le long des trajectoires des électrons et positons de la gerbe.

régulière, en forme d'épi avec un axe principal bien défini (figure de gauche de l'encadré 1), alors que l'image d'une gerbe hadronique sera plus irrégulière. Après la mise au point de cette technique par le groupe de l'observatoire Whipple [4] aux États-Unis, qui disposait d'un télescope de 10 m de diamètre, des améliorations instrumentales ont été apportées par l'expérience germano-espagnole HEGRA [5] avec un ensemble de 5 télescopes permettant une étude stéréoscopique des gerbes et par l'expérience française CAT [6] mettant à profit l'imagerie à haute définition et l'électronique rapide. Quelques sources remarquables aux énergies supérieures à 300 GeV ont été mises en évidence en une quinzaine d'années, mais il est vite apparu indispensable d'accroître la sensibilité des instruments existants pour obtenir un catalogue conséquent pour l'astronomie. L'expérience H.E.S.S., que nous présentons maintenant, ouvre la voie à une nouvelle génération d'instruments et ses premiers résultats, particulièrement prometteurs, font présager d'importantes avancées dans la compréhension des sources aux énergies inférieures à 10^{15} eV.



Figure 2 : Les quatre télescopes de H.E.S.S.

H.E.S.S. : l'instrument et ses performances

H.E.S.S. (ainsi nommée en hommage à Victor Hess) est une expérience d'astronomie gamma explorant le domaine allant d'environ 100 GeV à quelques dizaines de TeV. La collaboration H.E.S.S. regroupe principalement des laboratoires de France⁴, d'Allemagne, du Royaume-Uni, d'Afrique du Sud et de Namibie [7]. Installée en Namibie sur le tropique du Capricorne à 1800 m d'altitude, l'expérience est consacrée à l'observation du ciel austral qui donne accès à la plus grande partie de la Voie Lactée. L'installation comporte quatre grands télescopes (figure 2) situés aux sommets d'un carré de 120 m de côté. Chacun d'eux dispose d'un réflecteur de 12 m de diamètre et son plan focal est équipé d'une caméra de 960 photomultiplicateurs couvrant chacun $0,16^\circ$ pour un champ de vue total de 5° de diamètre (figures 3 et 4). La caméra (figure 3), construite par les laboratoires français, regroupe toute l'électronique de déclenchement et de lecture [8], ce qui évite de dégrader la résolution temporelle du signal par propagation le long de câbles. Le déclenchement d'un télescope exige un nombre minimal de photo-électrons dans un nombre minimal de photodétecteurs d'un même secteur de caméra. Quand un télescope satisfait cette condition, un signal est envoyé par fibre optique au système central de déclenchement qui exige la coïncidence entre au moins deux télescopes. Dans chaque caméra et pour chaque photodétecteur, le signal est stocké dans une mémoire analogique et intégré sur une fenêtre de 16 ns. Le premier télescope a commencé

4. IN2P3/CNRS, INSU/CNRS, DAPNIA/CEA.

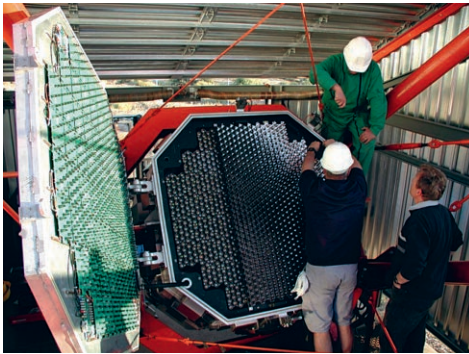


Figure 3 : Une caméra de H.E.S.S. avec ses 960 photomultiplicateurs. Les photo-diodes servant à leur étalonnage sont visibles sur la face interne de la porte.

à prendre des données en juin 2002 et l'installation s'est faite ensuite progressivement jusqu'à la mise en service complète des quatre télescopes en décembre 2003. Les données dont sont tirés les résultats présentés ici ont été prises pour une part pendant la période 2002-2003 avec deux ou trois télescopes seulement.

Dans sa configuration définitive, le seuil en énergie de H.E.S.S. pour une observation au voisinage du zénith⁵ est d'environ 100 GeV et sa sensibilité est alors de l'ordre du centième du flux de la nébuleuse du Crabe, soit dix fois meilleure que celle des expériences précédentes. C'est par sa capacité de rejet des gerbes hadroniques que l'expérience atteint cette performance : en combinant la finesse de grain de l'image et l'observation stéréoscopique, on reconstruit en effet avec précision la structure tridimensionnelle de la gerbe (figure 5) et on exploite au mieux les deux caractéristiques des cascades électromagnétiques qui les différencient des processus hadroniques : leur symétrie de révolution et leur faible largeur (voir encadré 1). Les gerbes hadroniques étant pour la plupart rejetées par l'analyse stéréoscopique, le fond résiduel est contrôlé en permanence en décalant la direction de visée alternativement de $\pm 0,5^\circ$ par rapport à celle de la source étudiée ; le point symétrique de la source par rapport au centre du champ constitue alors une source fictive (« anti-source ») sur laquelle ne pointent que des événements de fond. La stéréoscopie permet de reconstruire les propriétés tridimensionnelles de la gerbe, en particulier la direction du photon initial (figure 5), mais aussi son énergie. Quand la gerbe est vue par au moins trois télescopes, la résolution angulaire est de l'ordre de 3 minutes d'angle, bien meilleure que celle des satellites gamma opérant à plus basse énergie ; de même, on

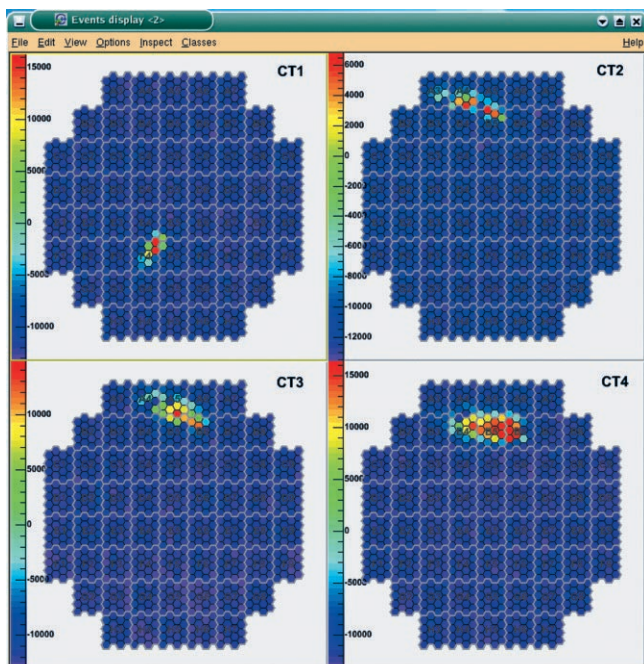


Figure 4 : Une gerbe atmosphérique observée sur les quatre caméras de H.E.S.S.

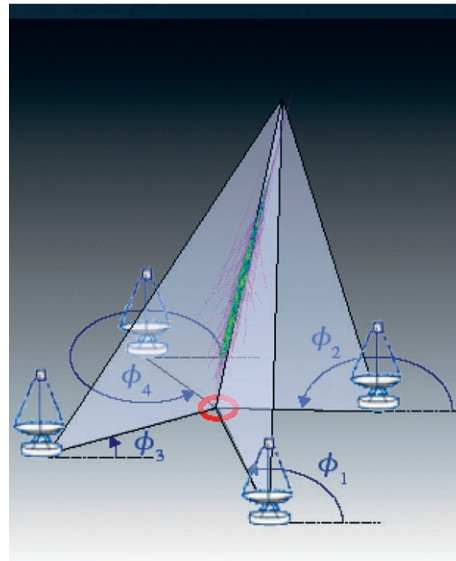


Figure 5 : Reconstruction stéréoscopique d'une gerbe.

reconstruit l'énergie du γ incident à 15-20% près. Pour s'assurer *a priori* des performances du détecteur et des méthodes d'analyse, la nébuleuse du Crabe, première source détectée dans le domaine du TeV, est la source la plus indiquée. Elle sert en effet de « chandelle standard » dans ce domaine d'énergie en raison de la stabilité de son émission. Depuis le site de H.E.S.S., elle est observable seulement à des angles zénithaux supérieurs à 45° , ce qui porte le seuil à environ 500 GeV. La figure 6 montre la distribution de la variable θ^2 , carré de l'écart angulaire entre l'axe reconstruit de la gerbe et la direction de la source; l'histogramme en grisé donne la contribution du fond hadronique résiduel, obtenue en comptant les gerbes pointant sur « l'anti-source ». Le signal apparaît clairement sur un fond faible et correspond à 11 γ par minute. Le spectre de la nébuleuse du Crabe mesuré par H.E.S.S. en 2003 avec ses trois premiers télescopes est en bon accord avec les mesures antérieures.

Premiers résultats de H.E.S.S.

Première image gamma d'un vestige de supernova

H.E.S.S. a déjà obtenu plusieurs résultats importants concernant l'origine des rayons cosmiques. Ainsi, l'analyse stéréoscopique des gerbes a permis de réaliser pour la première fois la cartographie d'une source étendue dans le domaine gamma : il s'agit du vestige de supernova RXJ 1713-3946 dont la structure en coquille apparaît clairement sur la figure 7. Cette image a été obtenue à partir de données prises en 2004 avec l'installation complète, mais les observations de 2003 avec deux télescopes seulement avaient déjà fourni une carte analogue [9] en se restreignant à des γ d'énergie supérieure à 600 GeV pour ramener le fond résiduel à un niveau très faible et porter la résolution angulaire à 3 minutes d'angle. Les théoriciens considèrent depuis longtemps les restes de supernovae de notre Galaxie comme les principaux accélérateurs de rayons cosmiques pour les énergies inférieures à 10^{14} eV [10], mais, jusqu'à maintenant, l'astronomie gamma n'avait pu en apporter la preuve directe, à l'exception du signal très faible obtenu par HEGRA sur Cassiopée A [11]. RXJ 1713-3946 est par ailleurs l'un des vestiges de supernova les plus brillants observés en rayons X ; le spectre X, dominé par un continuum non thermique, est vraisemblablement dû au rayonnement synchrotron des électrons accélérés dans l'objet. Une composante de protons interagissant dans le milieu environnant et produisant des mésons π^0 est aussi vraisemblable, comme le suggère la coïncidence des points d'intensité maximale en γ avec des nuages moléculaires identifiés par la raie radio de la molécule CO [12]. Par ailleurs, le spectre obtenu par H.E.S.S. dans cette analyse préliminaire est bien décrit par une loi de puissance avec un indice spectral différentiel $\gamma = 2,2 \pm 0,07$ (statistique) $\pm 0,1$ (systématique), très

⁵ Le seuil augmente avec l'angle zénithal.

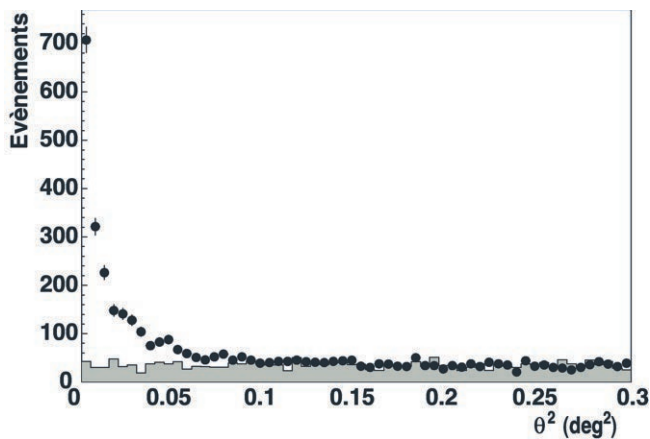


Figure 6 : Nébuleuse du Crabe : distribution de la variable θ^2 , carré de l'écart angulaire entre l'axe reconstruit de la gerbe et la direction de la source. L'histogramme en gris donne la contribution du fond hadronique résiduel (voir le texte).

proche de ce qu'on attend du mécanisme d'accélération de Fermi.

Le Centre Galactique

L'observation du Centre Galactique était évidemment l'un des objectifs prioritaires de H.E.S.S. Cette région contient en effet plusieurs sources potentielles de gamma de haute énergie : un trou noir de 2,6 millions de masses solaires, des vestiges de supernovae et peut-être une concentration de « matière noire » sous la forme d'hypothétiques neutralinos prédits, en physique des particules, par les théories de supersymétrie ; les neutralinos qui sont leurs propres antiparticules peuvent s'annihiler si leur concentration est suffisante et produire ainsi *in fine* des γ de haute énergie. H.E.S.S. a observé le Centre Galactique en 2003 avec deux télescopes [13] en deux périodes et a mis en évidence à chaque fois un signal significatif : $6,0 \sigma$ (σ est l'écart standard) en juin-juillet et $10,2 \sigma$ en août-septembre, pour un flux de l'ordre de 5 % de celui de la nébuleuse du Crabe. La source semble ponctuelle à la résolution de l'instrument (figure 8), ce qui permet de placer une borne supérieure de 7 parsecs⁶ sur son extension spatiale. Elle est compatible avec la position du trou noir central Sagittarius A* (Sgr A*), mais on notera que la zone de localisation comporte d'autres sources potentielles (reste de supernova, nuages moléculaires). Le spectre mesuré par H.E.S.S. est également

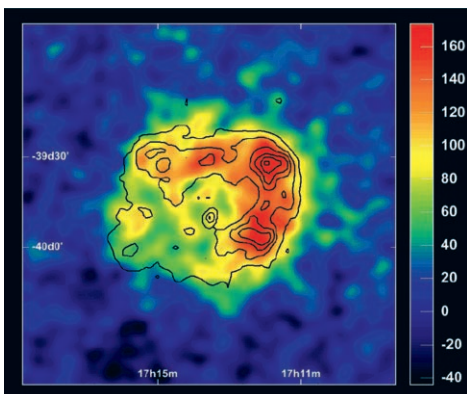


Figure 7 : Carte en coordonnées célestes du vestige de supernova en coquille RXJ 1713-3946 obtenue à partir des données de 2004 avec les quatre télescopes. Les contours superposés à l'image en γ donnent l'intensité de l'émission en rayons X obtenue par le satellite japonais ASCA. (Les coordonnées, ainsi que celles des figures 8 et 11, sont en convention astronomique : ascension droite en heures et minutes de temps, et déclinaison en degrés et minutes d'angle.)

bien décrit par une loi de puissance (figure 9) d'indice spectral différentiel $\gamma = 2,39 \pm 0,09$ (statistique) $\pm 0,10$ (systématique). Dans la limite des erreurs de mesure, les spectres correspondant aux deux périodes sont compatibles. Ces résultats sont très différents de ceux qui avaient été annoncés par l'expérience CANGAROO (Japon - Australie) à partir de données

prises en 2001 et 2002 [14]. Le flux très élevé aux alentours de 200 GeV publié par cette expérience (figure 9) aurait dû être détecté par H.E.S.S. en quelques minutes. La contribution d'éventuels neutralinos ne peut être dominante dans le spectre très peu pentu observé par H.E.S.S. à moins d'envisager pour cette particule une masse supérieure à 7,5 TeV, peu vraisemblable dans le cadre des modèles de supersymétrie. En revanche, le spectre peut facilement s'interpréter par l'interaction des rayons cosmiques (éventuellement accélérés par un reste de supernova proche) avec les nuages moléculaires de la région centrale de la Voie Lactée ; dans ce cas, l'intensité de la source ne devrait pas varier notablement. Effectivement, le spectre mesuré par H.E.S.S. en 2004 avec les quatre télescopes reproduit parfaitement les résultats de 2003.

Détection d'un système binaire pulsar-étoile massive

H.E.S.S. a également annoncé en février et mars 2004 la première détection dans le domaine gamma d'un système binaire de notre Galaxie [17] : le pulsar milliseconde PSR B 1259-63 décrit en effet une orbite très excentrique autour d'une étoile d'environ 10 masses solaires (étoile B2e SS 2883) avec une période d'environ 3 ans. Lorsque le pulsar passe au voisinage du périastre⁷ (7 mars 2004), son vent composé d'électrons et de positons relativistes interagit avec le vent très important de l'étoile et le choc ainsi formé est un site d'accélération de particules (figure 10). Cet objet était connu comme source de rayons X, vraisemblablement dus au rayonnement synchrotron des électrons accélérés. De plus, la haute densité de photons visibles et infrarouges au voisinage de l'étoile fournit des cibles aux électrons énergétiques qui propulsent ces photons dans le domaine γ de haute énergie par effet Compton inverse ; ce phénomène, bien que prédit depuis plusieurs années [18], n'avait pu être détecté par les télescopes de la génération précédente. Le flux observé par H.E.S.S. à la fin du mois de février était de l'ordre de 10 % de celui de la nébuleuse du Crabe. Toutefois, l'observation du pulsar réservait une surprise : comme le montre la figure 11, une autre source, légèrement étendue, est présente dans le champ de vue. Afin de vérifier qu'il ne s'agissait pas d'un artefact, les données ont été soumises à plusieurs analyses indépendantes et on a fait varier les conditions d'observation [19]. Le signal est resté à un niveau de flux constant (contrairement au pulsar) entre février et juin 2004. Aucune

contrepartie dans les autres domaines du spectre électromagnétique n'a pu lui être associée. Ce nouvel

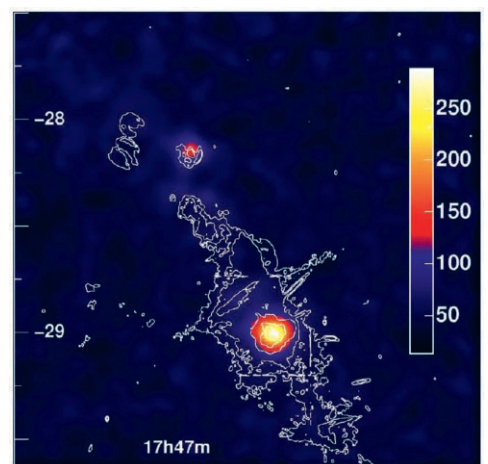


Figure 8 : Distribution (en coordonnées célestes) des candidats γ dans la région de Sgr A*. L'image est obtenue à partir des données prises en 2004 avec les quatre télescopes. L'échelle de couleur correspond au nombre d'événements par intervalle ; la source principale en bas de l'image coïncide avec la position de Sgr A*. La seconde source moins intense en haut est le vestige de supernova G0.9+0.1. Les contours blancs correspondent à l'émission radio à 90 cm [15].

6. 1 parsec \equiv 3,26 années-lumière.

7. Périastre : point de l'orbite où la distance à l'étoile est minimale.

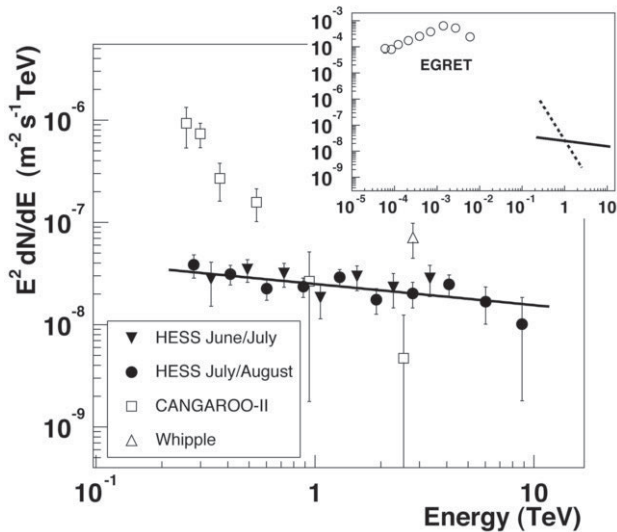


Figure 9 : Spectre γ de la source HESS associée à Sgr A* : puissance émise par intervalle logarithmique d'énergie $E^2 d\phi/dE$ en fonction de l'énergie E . Les cercles pleins concernent la période août-septembre 2003 et les triangles pleins la période juin-juillet 2003. Les carrés indiquent les résultats publiés par l'expérience CANGAROO et le triangle vide ceux de l'observatoire Whipple [16]. Dans l'encart, on a aussi indiqué les mesures du détecteur EGRET (satellite Compton Gamma-Ray Observatory) dont la résolution angulaire, de l'ordre du degré, couvre cependant une zone beaucoup plus large de la région centrale et peut englober d'autres sources.

objet, baptisé HESS H 1303-631, représente-t-il un nouveau site d'accélération de rayons cosmiques ou une région d'interaction de ces derniers avec des nuages moléculaires denses ? La réponse pourrait venir de l'observation d'autres objets semblables éventuels. Un relevé systématique de la région centrale du plan galactique vient d'être entrepris en ce sens par l'expérience H.E.S.S. et a déjà permis de découvrir plusieurs sources [20].

Une source extra-galactique : le blazar PKS 2155-304

Dans le domaine extra-galactique, H.E.S.S. a détecté le noyau actif de la galaxie PKS 2155-304. Certaines galaxies possèdent en leur centre un trou noir « supermassif » (de quelques 10^6 à quelques 10^9 masses solaires) accrétant la matière environnante dont une partie est parfois éjectée sous forme de puissants jets de plasma relativiste. Celles de ces

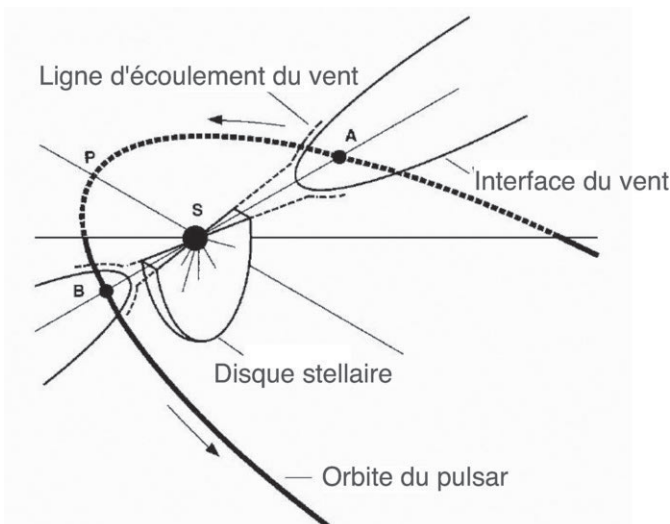


Figure 10 : Schéma de l'interaction entre le vent du pulsar PSR B 1259-63 et celui de l'étoile Be avec laquelle il forme un système binaire. S : étoile. B : périastre.

sources qui émettent dans le domaine γ possèdent effectivement des jets dont l'axe est relativement proche de la ligne de visée ; on les nomme « blazars ». Le détecteur EGRET à bord du satellite Compton Gamma-Ray Observatory en a détecté une soixantaine dans le domaine du GeV. Aux très hautes énergies,

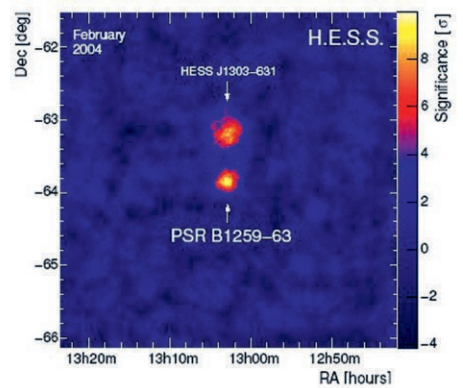


Figure 11 : Champ de vue autour du pulsar PS 1259-63. Au-dessus de l'image du pulsar, on voit clairement apparaître une autre source d'extension $0,2^\circ$ environ dont on n'a pas trouvé de contrepartie dans les autres longueurs d'onde.

les expériences de la génération précédente dans l'hémisphère nord en avaient observé un petit nombre seulement, tous relativement proches sur une échelle cosmologique, c'est-à-dire caractérisés par des décalages spectraux⁸ z inférieurs à 0,1, sauf un : 1ES 1428+426 ($z = 0,128$). Cette restriction aux faibles valeurs de z s'interprète par l'absorption des γ de très haute énergie par les photons infrarouges et optiques du fond diffus intergalactique – par ailleurs très mal connu – selon la réaction $\gamma + \text{photon} \rightarrow e^+ + e^-$. PKS 2155-304 est très intéressant de ce point de vue en raison de son décalage spectral $z = 0,116$ qui en fait une source soumise à cet effet d'absorption. H.E.S.S. a observé la source à diverses périodes de 2002 à 2004 et mesuré, au-dessus de 300 GeV, des flux variant entre 10 % et 60 % de celui de la nébuleuse du Crabe. Le spectre, compatible avec une loi de puissance d'indice spectral différentiel $\gamma = 3,32 \pm 0,06$, est beaucoup plus pentu que ceux des blazars proches émettant au TeV [21]. Un indice spectral tout aussi élevé avait été obtenu par HEGRA et CAT sur 1ES 1428 + 426, suggérant une forte atténuation de cette partie du spectre, due à l'absorption. L'observation de plusieurs blazars à des distances différentes devrait permettre dans l'avenir de mieux connaître le fond diffus infrarouge extra-galactique, une des clefs pour comprendre la formation des galaxies.

Conclusion et perspectives

La série de découvertes obtenues par H.E.S.S. dans ses deux premières années de fonctionnement montre bien que la sensibilité nécessaire pour l'étude de l'émission au-delà de 100 GeV est maintenant atteinte. En 2005, de nouveaux résultats importants de H.E.S.S. sont apparus, entre autres de sources imprévues dans le relevé systématique du plan galactique [19, 20], l'image d'un second reste de supernova étendu RXJ0852.0-4622 [22], la détection d'un autre système binaire LS5039 [23] qui est peut-être un « microquasar », et la découverte d'un nouveau blazar PKS2005-489 [24].

On projette maintenant de compléter l'installation par un très grand télescope de 28 m de diamètre, dont le détecteur focal comporterait 2000 photomultiplicateurs (projet H.E.S.S. II) ; on pourra alors notablement étendre l'observation vers les basses énergies (50 GeV en stéréoscopie et 10 GeV avec le seul très grand télescope) et disposer d'une plage de recouvrement en énergie avec le satellite GLAST que la NASA prévoit de lancer en 2007. Des thèmes importants pourront ainsi être approfondis, comme l'origine des gamma des vestiges

8. En cosmologie, on caractérise l'éloignement de la source par le décalage spectral z dû à l'expansion de l'Univers ; les distances, en particulier les longueurs d'ondes, se sont dilatées dans le rapport $1+z$ entre l'émission et la détection du signal.

de supernovae (désintégration de mésons π^0 ou effet Compton inverse ?), la nature des sources non encore identifiées ou l'étude des spectres des blazars plus lointains. Les rôles de ces différents accélérateurs cosmiques devraient donc se préciser dans les années à venir.

Références

- [1] V. F. Hess, *Phys. Z.* **14** (1913) 610.
- [2] P. Auger, R. Maze et R. Chaminade, *C. R. Acad. Sci. Paris* **206** (1938) 1721.
- [3] K. Greisen, *Ann. Rev. of Nucl. Science* **10** (1960) 63.
- [4] T. Weekes et al., *ApJ* **342** (1989) 379.
- [5] A. Daum et al., *Astropart. Phys.* **8** (1997) 1.
- [6] A. Barrau et al., *Nucl. Instr. and Meth.* **416** (1998) 278.
- [7] W. Hofmann, *Proc. of the 28th ICRC* (Tsukuba) (2003) 2811.
- [8] P. Vincent, *Proc. of the 28th ICRC* (Tsukuba) (2003) 2887.
- [9] F. Aharonian et al., *Nature* **432** (2004) 75.
- [10] P.-O. Lagage et C. Cesarsky, *Astron. Astrophys.* **118** (1983) 223 et **125** (1983) 249.
- [11] E. G. Berezhko, G. Pühlhofer et H. J. Volk, *Astron. Astrophys.* **400** (2003) 971.
- [12] Y. Fukui et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **73** (2002) L73.
- [13] F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **425** (2004) L13.
- [14] K. Tsuchiya et al., *ApJ* **606** (2004) L115.
- [15] T. N. LaRosa et al., *AJ* **119** (2000) 207.
- [16] K. Kosack et al., *ApJ* **608** (2004) L97.
- [17] F. Aharonian et al., astro-ph/0506280, accepté dans *Astron. Astrophys.*
- [18] J. Kirk et al., *Astropart. Phys.* **10** (1999) 31.
- [19] F. Aharonian et al., astro-ph/0505219, accepté dans *Astron. Astrophys.*
- [20] F. Aharonian et al., *Science* **307** (2005) 1938.
- [21] F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **430** (2005) 865.
- [22] F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **437** (2005) L7.
- [23] F. Aharonian et al., *Science* **309** (2005), 746.
- [24] F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **436** (2005) L17.