

Longtemps l'exploration de l'Univers dans le domaine des rayonnements gamma de très haute énergie est restée marginale. Aujourd'hui cette exploration se développe et ouvre une nouvelle fenêtre sur le cosmos.

**A**u cœur des hauts plateaux namibiens, par une nuit sans lune, quatre grands télescopes pointent en direction du centre galactique. Pour autant, ils n'observent pas directement les étoiles : ils tentent de capter des phénomènes beaucoup plus proches, de rares éclairs de lumière qui surgissent quelques kilomètres au-dessus d'eux, si faibles et si fugaces qu'ils sont invisibles à l'œil nu.

Ces éclairs sont la signature ultime des phénomènes les plus énergétiques du cosmos. Ils résultent de la péné-

tration dans l'atmosphère terrestre de rayons gamma de très haute énergie, produits dans les sites cosmiques où des particules sont violemment accélérées, tels les vestiges de supernovae, les pulsars ou les abords des trous noirs.

La détection indirecte de ces rayons gamma de très haute énergie depuis le sol, mise en œuvre au sein de l'expérience HESS (*High Energy Stereoscopic System*, c'est-à-dire système stéréoscopique de haute énergie, ainsi nommé en hommage à Victor Hess, pionnier de l'étude du rayonnement cosmique) ouvre aujourd'hui une nouvelle fenêtre – celle de

# Astronomie gamma : le ciel révélé aux très hautes énergies

Bernard Degrange • Hélène Sol

**1. Certaines galaxies elliptiques** abritent en leur centre un trou noir massif qui éjecte de gigantesques jets de plasma (représentés ci-contre sur une vue d'artiste). On en a observé une soixantaine dans le domaine des hautes énergies. Ces objets sont emblématiques d'une physique des très hautes énergies que les astrophysiciens commencent à explorer de façon systématique avec des détecteurs de rayons gamma efficaces.



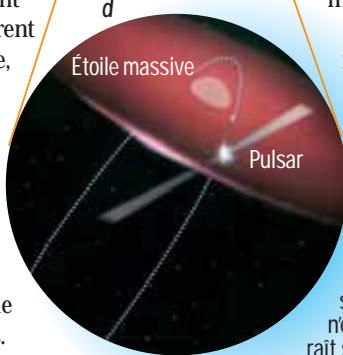
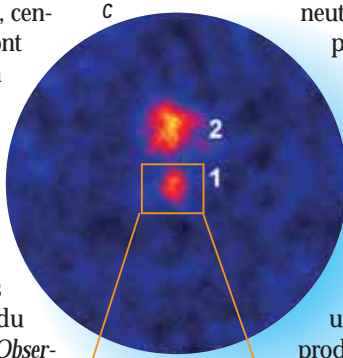
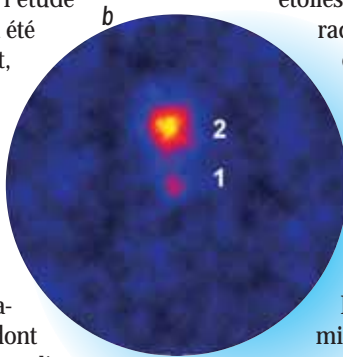
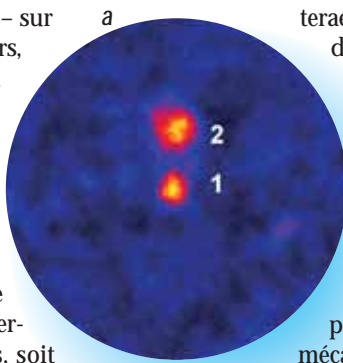
l'astronomie gamma de très haute énergie – sur les phénomènes les plus extrêmes de l'Univers, et livre une moisson de résultats remarquables.

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, le champ d'investigation de l'astronomie s'est étendu de la lumière visible à l'ensemble du spectre électromagnétique, des ondes radio jusqu'aux rayonnements les plus énergétiques : les rayons gamma. Le domaine des rayons gamma commence à la frontière avec les rayons X, avec des photons dont l'énergie est de l'ordre de 100 kiloélectronvolts, soit 100 000 fois celle d'un photon de lumière visible. Il s'étend aujourd'hui jusqu'à 30 téraélectronvolts ( $10^{12}$  électronvolts), soit 3 000 milliards de fois l'énergie de la lumière visible.

L'intérêt du rayonnement gamma pour l'étude des processus cosmiques très énergétiques a été souligné dès les années 1960. Pour autant, l'astronomie gamma a dû relever des défis expérimentaux considérables en termes de sensibilité et de résolution spatiale. En effet, les rayonnements les plus énergétiques sont aussi les moins intenses, car le flux de particules cosmiques décroît rapidement avec leur énergie. De plus, contrairement à la lumière visible, il est encore impossible de focaliser des photons gamma de haute énergie, dont la longueur d'onde est inférieure aux dimensions d'un noyau atomique.

Depuis les premières observations en 1961, néanmoins, la gamme d'énergie étudiée n'a cessé de s'étendre. En 1967, les satellites militaires de la série VELA, censés surveiller les tests nucléaires clandestins, ont ainsi découvert des bouffées de rayons gamma de l'ordre du mégaélectronvolt ( $10^6$  électronvolts) provenant du cosmos ; on les nomme aujourd'hui les sursauts gamma. Les satellites SAS-2 et COS-B ont ensuite exploré dans les années 1970 le domaine situé entre 100 mégaélectronvolts et quelques gigaélectronvolts ( $10^9$  électronvolts). Puis, dans les années 1990, l'Observatoire Compton du rayonnement gamma (*Compton Gamma-ray Observatory*) a couvert le vaste domaine compris entre 50 kiloélectronvolts et 30 gigaélectronvolts. On a alors découvert que les sursauts gammas, que l'on croyait d'origine galactique, surviennent dans l'Univers extragalactique lointain et libèrent en quelques secondes une énergie gigantesque, équivalant à l'énergie libérée lors d'une explosion ou d'une collision d'étoiles. Le détecteur EGRET a révélé l'existence d'un fond diffus de rayonnement gamma de haute énergie, dû à l'interaction des rayons cosmiques (des particules chargées très énergétiques) avec le milieu interstellaire, et a fourni le premier catalogue des sources gamma de haute énergie, recensant environ 300 sources.

Il est toutefois crucial de pousser l'exploration plus loin, dans le domaine des très hautes énergies, à l'échelle du



teraélectronvolt et au-delà, car c'est le royaume des phénomènes très énergétiques, en jeu dans les mystérieux « accélérateurs cosmiques ».

En effet, les rayons gamma sont issus d'interactions de particules chargées accélérées à très haute énergie. Il peut s'agir d'électrons atteignant des vitesses proches de celle de la lumière, qui interagissent avec les rayonnements présents dans l'environnement de la source accélératrice ; ils produisent des rayonnements gamma par des mécanismes nommés émission synchrotron ou effet Compton inverse (voir l'encadré page 37). Ces mécanismes sont dits leptoniques. Ils semblent être à l'œuvre dans plusieurs types de sources « compactes », tels les pulsars (des étoiles à neutrons émettant des faisceaux d'ondes radio), les plérions (les nébuleuses entourant certains pulsars), les systèmes d'étoiles binaires émetteurs de rayons X, ou encore les noyaux actifs de galaxies.

Le rayonnement gamma de très haute énergie peut aussi résulter de l'interaction des rayons cosmiques avec le gaz interstellaire. Les rayons cosmiques, découverts en 1912 par le physicien autrichien Victor Hess, sont des protons et des noyaux atomiques traversant le cosmos, et accélérés à des énergies colossales, bien supérieures à celles atteintes par les accélérateurs construits par l'homme. En percutant les noyaux du gaz, ces protons déclenchent des réactions nucléaires qui engendrent notamment des mésons pi neutres, lesquels se désintègrent en émettant deux photons gamma. Ce mécanisme, dit hadronique, est sans doute à l'œuvre dans tous les sites d'accélération et de propagation des rayons cosmiques, notamment les restes de supernovae, les nuages moléculaires interstellaires ou les disques galactiques. Les rayons gamma de très haute énergie révèlent ainsi le gaz qui entoure les accélérateurs cosmiques. Enfin, il existe peut-être un troisième mode, encore hypothétique, de production de rayons gamma de très hautes énergies : l'annihilation des neutralinos, des particules prédites par les théories de supersymétrie et qui pourraient être des vestiges de l'Univers primordial. Nous y reviendrons.

Si les rayons gamma sont si précieux pour identifier et observer les sites d'accélération de particules, c'est que les rayons cosmiques, électriquement chargés, sont

## 2. L'observation du ciel par l'expérience

HESS réserve aux astronomes des surprises : en suivant le système binaire PSR-B1259-63 (1 sur a, b et c), ils ont découvert dans le champ de visée une autre source de rayonnement gamma (2), mais s'interrogent encore sur sa nature. Le système binaire 1 n'est pas résolu sur les trois prises de vues, mais il apparaît sur la vue d'artiste ci-contre (d). Le vent du pulsar, interagissant avec celui de l'étoile (le disque), accélère les électrons qui émettent des rayons gamma énergétiques.

déviés par les champs magnétiques présents dans le milieu interstellaire, de sorte que leur direction à l'arrivée sur Terre n'indique pas celle de leur source. En revanche, les photons gamma, qu'ils soient produits par la voie leptonique ou par la voie hadronique, ne sont pas déviés au cours de leur trajet, et révèlent directement les accélérateurs cosmiques et les phénomènes qui se produisent dans leur voisinage immédiat.

## La percée de l'astronomie gamma au sol

Le rayonnement gamma de très haute énergie est donc une fenêtre sur les phénomènes cosmiques mettant en jeu des accélérations de particules. Mais jusqu'à récemment, cette fenêtre était à peine explorée. Alors que l'observation spatiale est adaptée aux rayons gamma de plus basse énergie – leur flux important permet de les détecter avec des instruments de taille réduite – les photons gamma de très haute énergie sont si peu nombreux qu'il faudrait des surfaces de détection de l'ordre de l'hectare pour en collecter suffisamment. Il faut donc les détecter indirectement depuis le sol.

Un photon gamma de très haute énergie pénètre dans l'atmosphère terrestre en y créant une gerbe d'électrons, de

positons et de rayons gamma secondaires, dont le nombre est maximal vers 10 kilomètres d'altitude (*voir l'encadré ci-dessous*). Les particules chargées de cette cascade vont plus vite que la lumière dans l'air, et, de ce fait, émettent un rayonnement dit Tcherenkov. La gerbe produit un éclair collimaté, qui illumine au sol une zone d'environ 300 mètres de diamètre.

L'effet Tcherenkov atmosphérique a été observé dès les années 1950, mais les obstacles techniques à son utilisation en astronomie n'ont été surmontés que dans les années 1990. En théorie, il suffit de détecter le rayonnement Tcherenkov pour remonter à la cascade qui lui a donné naissance, et aux caractéristiques du photon gamma incident. Cependant, l'éclair de lumière Tcherenkov est faible et ne dure que quelques milliardièmes de seconde. Il a donc fallu mettre en œuvre des photomultiplicateurs et des dispositifs d'électronique rapide typiques de la physique des particules pour obtenir des détecteurs suffisamment sensibles, utilisables par nuit noire. La seconde difficulté, plus grande encore, est que les rayons cosmiques qui pénètrent dans l'atmosphère engendrent aussi des gerbes de particules émettant un rayonnement Tcherenkov, et qu'ils sont beaucoup plus nombreux que les rayons gamma (les rayons gamma représentent moins de un pour mille des rayons cosmiques). Il faut donc trier les gerbes issues de rayons gamma de celles engendrées par les rayons cosmiques, qui ne renseignent en rien sur leur source.

## L'atmosphère terrestre : un détecteur de rayons gamma

Les astrophysiciens détectent indirectement les sources de rayonnement gamma très énergétiques en observant les effets que produisent les photons gamma lorsqu'ils pénètrent dans l'atmosphère terrestre. L'interaction d'un photon gamma de haute énergie avec un noyau atomique de l'air crée une paire électron-positon. Ces particules interagissent à leur tour avec les noyaux en émettant des rayons gamma secondaires, qui entraînent la création d'autres paires électron-positon, et ainsi de suite en cascade. Le photon gamma incident engendre ainsi une gerbe d'électrons, de positons et de rayons gamma. Pour un photon incident d'une énergie de un téraélectronvolt, cette gerbe électromagnétique atteint son développement maximum autour de dix kilomètres d'altitude, avec un millier de particules chargées. Les particules étant déviées par les multiples collisions, la gerbe s'élargit progressivement, mais elle reste relativement collimatée et symétrique.

Les rayons cosmiques créent aussi des cascades de particules en pénétrant dans l'atmosphère, mais les interactions nucléaires en jeu mènent à une évolution bien plus aléatoire de la gerbe, où la symétrie de révolution n'est pas conservée. Les gerbes hadroniques (protons ou noyaux) sont ainsi plus larges et moins organisées que les gerbes électromagnétiques.

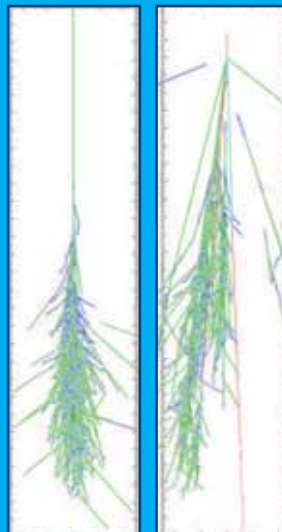
Comment ces gerbes sont-elles détectées ? Lorsqu'une particule chargée traverse un matériau à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans ce milieu, elle émet un rayonnement le long d'un cône centré sur la direction de pro-

pagation et dont l'angle est d'autant plus faible que l'indice de réfraction est proche de l'unité. Cet effet a été découvert en 1937 par le physicien russe Tcherenkov.

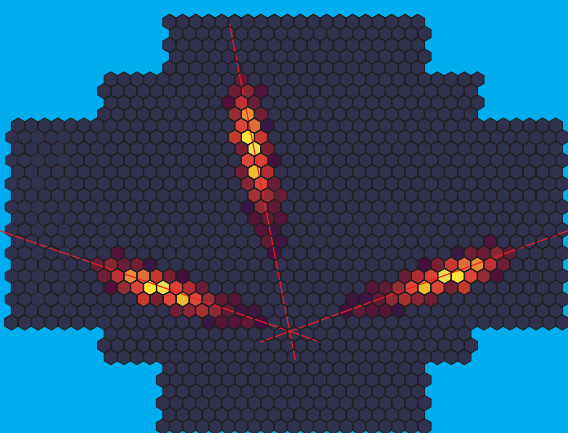
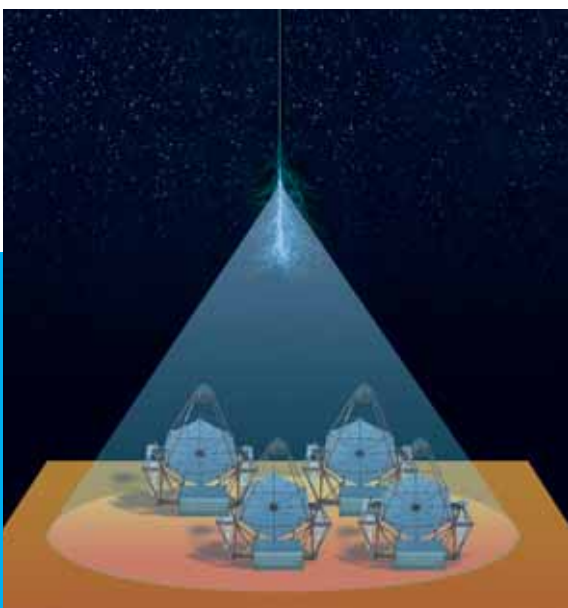
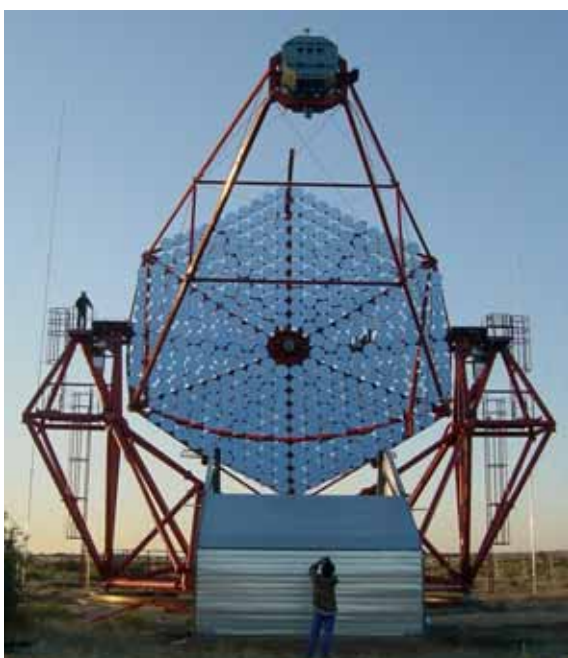
Les particules des gerbes électromagnétiques et hadroniques émettent ainsi un rayonnement Tcherenkov. Dans une gerbe atmosphérique, l'angle du cône de lumière reste inférieur à un degré, et les particules rayonnent sur la plus grande partie de leur parcours, si bien que l'émission Tcherenkov illumine au sol une zone d'environ 300 mètres de diamètre.

Cet éclair de lumière est à la fois très faible et très fugace) et nécessite, pour être détecté, des photomultiplicateurs rapides utilisés habituellement en physique des particules.

L'observation stéréoscopique du rayonnement Tcherenkov permet de reconstruire le point d'impact et la direction de la gerbe, et donc de remonter aux caractéristiques du photon ou de la particule initiale. En donnant accès à la forme tridimensionnelle précise des gerbes, la stéréoscopie permet surtout de distinguer celles produites par des rayons gamma de celles, très majoritaires, issues de rayons cosmiques. En associant stéréoscopie et haute définition, HESS élimine ainsi plus de 99,9 pour cent des gerbes issues de rayons cosmiques, et a ainsi révolutionné l'observation gamma par effet Tcherenkov.



Simulations de gerbes créées par un photon gamma (à gauche) et un proton (à droite), d'une énergie de 300 gigaélectronvolts. Les photons gamma sont en vert, les électrons et les positons en bleu.



Le réseau HESS est constitué de quatre télescopes identiques (en haut). Le rayonnement émis par une gerbe cosmique est enregistré par ces télescopes (au milieu). La superposition des images d'une même gerbe recueillie par trois des télescopes (en bas) permet d'obtenir la direction d'origine du photon gamma (point-source sur la sphère céleste).

À la fin des années 1980, Trevor Weekes et ses collègues de l'Observatoire *Whipple* en Arizona ont eu l'idée de comparer la forme des différentes gerbes en observant leurs images en lumière Tcherenkov. Les images de gerbes issues de rayons gamma ressemblent en effet à un épi régulier avec un axe net qui pointe vers la source, et sont plus étroites et plus symétriques que celles résultant de rayons cosmiques. L'analyse de l'image des gerbes recueillies avec une caméra composée de 37 photomultiplicateurs au foyer du télescope de l'Observatoire *Whipple* a révélé, en 1989, la première source indiscutable de rayons gamma de très haute énergie, la nébuleuse du Crabe.

## Une moisson d'observations

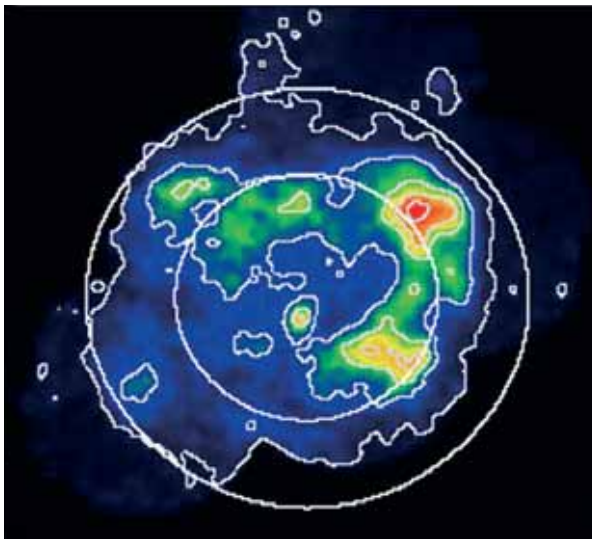
Dans les années 1990, les capteurs ont été améliorés (expérience française CAT, avec 600 photomultiplicateurs) et la détection stéréoscopique a été introduite (expérience germano-espagnole HEGRA à cinq télescopes). En observant simultanément les gerbes avec plusieurs télescopes, on reconstruit précisément leur forme spatiale et on élimine ainsi plus efficacement les gerbes issues de rayons cosmiques. Toutefois, jusqu'en 2000, on ne dénombrait qu'une poignée de sources gamma bien identifiées aux très hautes énergies, pour la plupart extragalactiques.

L'expérience internationale HESS regroupant une centaine de physiciens pour la plupart européens (France, Allemagne, Royaume uni, Irlande, République tchèque, Arménie, Namibie et Afrique du Sud) a capitalisé l'ensemble des progrès précédents. Quatre télescopes de 12 mètres de diamètre disposés aux coins d'un carré de 120 mètres de côté, équipés de caméras comportant chacune 960 photomultiplicateurs, ont été installés en Namibie en 2002 et 2003.

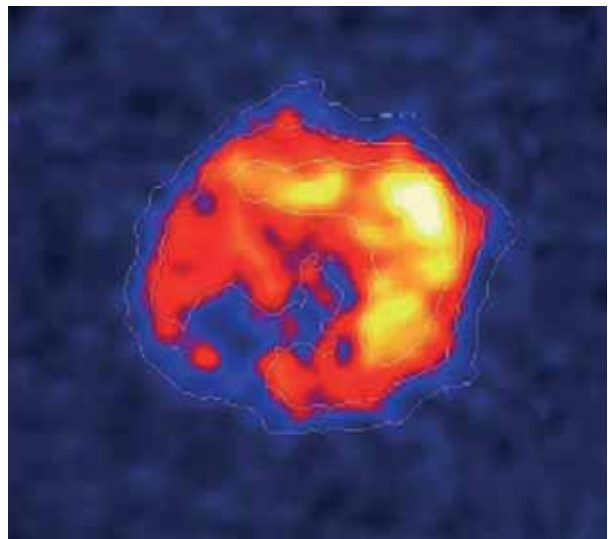
HESS élimine plus de 99,9 pour cent des gerbes issues des rayons cosmiques, ce qui représente un gain de sensibilité spectaculaire : il détecte la nébuleuse du Crabe en 30 secondes de pose, là où 20 heures étaient nécessaires en 1989. Sa résolution est aussi remarquable : lorsque la gerbe est captée par les quatre télescopes, la résolution est de quatre minutes d'arc, meilleure que celle des satellites gamma de plus basse énergie (par ailleurs, la source est localisée avec une précision de 30 secondes d'arc). La résolution spatiale et le grand champ de vision (cinq degrés) de HESS permettent, pour la première fois en astronomie gamma, de cartographier des sources étendues tels les vestiges de supernovae.

À peine deux ans après sa mise en service, HESS a complètement renouvelé l'astronomie gamma de très haute énergie en réalisant une moisson de plus d'une trentaine de nouvelles sources, galactiques pour la plupart, multipliant par un facteur quatre le nombre de sources connues. Dès les premières observations, HESS a levé en partie le voile sur la nature des accélérateurs cosmiques galactiques. Une première cartographie systématique, entreprise dès 2004, de la zone centrale de la Voie lactée a déjà recensé 17 sources gamma de très haute énergie. Elles ont révélé que les nébuleuses de pulsars, les vestiges de supernovae et les systèmes binaires X accélèrent des particules jusqu'à au moins 100 teraélectronvolts.

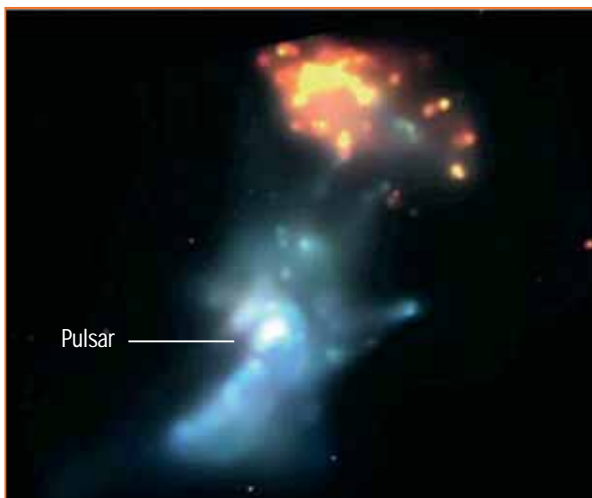
Lorsqu'une nouvelle source de rayons gamma est repérée, les astronomes recherchent des équivalents dans



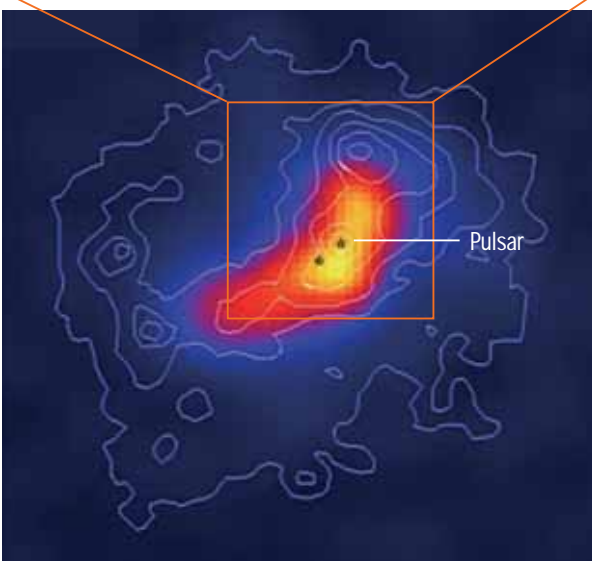
3. Le vestige de supernova RXJ1713.7-3946 a été « photographié » en rayons X par le satellite japonais ASCA (à gauche) et en rayonnement gamma de très haute énergie par l'expérience HESS (à droite). On distingue bien la structure en coquille. C'est la première fois qu'un objet



aussi étendu (un degré de rayon, soit deux fois celui du Soleil) a été cartographié en astronomie gamma, la résolution angulaire de HESS étant de quatre à six minutes d'arc. Ces images ont été obtenues en fausses couleurs, le jaune correspondant à l'intensité maximale (sur l'image de droite).



Pulsar



Pulsar

4. La première image de la nébuleuse de pulsar MSH 15-52 a été détectée par l'expérience HESS à très haute énergie (en bas). La même nébuleuse a été cartographiée en X par le satellite CHANDRA (en haut).

d'autres longueurs d'onde. Il est en effet difficile de distinguer directement si l'émission gamma est d'origine leptannique ou hadronique. Néanmoins, dans le premier cas, on s'attend à observer des contreparties de la source en ondes radio et en rayons X, dues à l'émission synchrotron des électrons ; les contreparties en lumière visible sont difficiles à identifier, car plusieurs sources optiques sont présentes dans la zone du ciel où est située la source gamma (étant donné l'incertitude de plusieurs secondes d'arc sur sa position). Une source dépourvue de contreparties en radio comme en X signifierait ainsi l'existence d'un nouveau type d'accélérateur cosmique « sombre », un accélérateur de protons exclusivement ou un accélérateur faiblement magnétisé, dont la description théorique reste à élaborer.

L'analyse en rayons X et en ondes radio des sources détectées jusqu'ici par HESS dans les régions centrales du plan galactique a permis d'associer au moins quatre d'entre elles à des restes de supernovae. Lorsqu'une étoile explose en supernova, l'onde de choc sphérique qui en résulte se propage dans le milieu interstellaire. Elle y accélère des particules et façonne une « coquille » rayonnante. Des électrons accélérés à une énergie suffisamment élevée émettent alors en gamma dans le domaine des téraélectronvolts par effet Compton inverse. Si le milieu environnant est suffisamment dense, l'interaction avec des protons accélérés conduit aussi à une émission gamma.

Deux autres sources correspondent à des nébuleuses de pulsar, un pulsar étant le résidu très compact d'une étoile ayant explosé en supernova, qui tourne rapidement sur lui-même en émettant des faisceaux d'ondes radio par ses pôles magnétiques. Ces pulsars émettent des faisceaux d'électrons et de positons accélérés par d'intenses forces électromagnétiques (le « vent » du pulsar), dont l'émission synchrotron dessine une nébuleuse diffuse autour du pulsar, nommée plérion. Parvenues aux limites de la magnétosphère du pulsar, ces particules interagissent avec le gaz environnant. Des chocs surviennent au cours desquels les particules sont réaccélérées, ce qui peut induire une émis-

sion gamma de très haute énergie. La luminosité gamma effectivement observée est bien compatible avec les bilans énergétiques prédits pour les pulsars et les restes de supernovae, ce qui conforte ce scénario.

Trois autres objets ont des positions compatibles avec des sources X et gamma moins énergétiques, notamment deux couples d'étoiles binaires X « enfouies », un nouveau type de sources récemment découvert par le satellite INTEGRAL de l'Agence spatiale européenne. Finalement, trois sources de ce premier relevé restent à ce jour sans contrepartie à basse énergie. Elles pourraient être des accélérateurs sombres évoqués précédemment. La prudence est néanmoins de mise : des recherches plus poussées pourraient révéler de faibles contreparties, qui auraient échappé aux premières investigations.

## Quelques stars gamma

Outre la cartographie systématique du plan galactique, HESS a effectué des observations ciblées d'objets susceptibles d'émettre des rayons gamma très énergétiques, et nombre d'entre eux se sont effectivement révélés être des sources gamma aux énergies du téraélectronvolt. C'est le cas par exemple d'un système binaire formé d'un pulsar (PSR B1259-63) en orbite autour d'une étoile massive dont le vent stellaire constitue un disque autour de l'équateur (voir la figure 2). Lorsque le pulsar traverse ce disque, l'interaction du vent du pulsar avec les photons et le gaz du disque produit un rayonnement gamma de très haute énergie, dont HESS a effectivement observé la variation début 2004 lors du passage du pulsar près de l'étoile, puis la décroissance progressive à mesure que le pulsar s'éloignait de son compagnon.

Par un heureux hasard, le champ de vision, centré sur le système binaire, contenait une autre source gamma de très haute énergie, totalement inattendue, ce qui a renforcé l'espoir de découvrir de nouvelles sources en grand nombre. À la différence du pulsar binaire, cette source gamma, nommée HESS J1303-631, est étendue, et sa luminosité est constante. Aucune contrepartie dans d'autres longueurs d'ondes n'a été détectée pour le moment. Il existe bien un pulsar radio à 4,9 minutes d'arc, mais l'énergie de rotation qu'il peut dissiper (mesurée par le ralentissement de sa période) semble insuffisante pour alimenter la production des rayons gamma de haute énergie avec une telle intensité.

Parmi les autres objets ciblés qui se sont révélés être des sources brillantes de rayons gamma de très hautes énergies, se trouvent des objets issus d'explosions de supernovae : vestiges en coquilles (voir la figure 3), nébuleuses de pulsars (voir la figure 4), mais aussi des restes composites. Ces sources composites présentent simultanément une nébuleuse de pulsar en leur centre, qui domine l'émission aux très hautes énergies, et une structure externe en coquille. En revanche, dans les restes de supernovae en coquille tels Vela junior et RX J1713-3946, les motifs de l'émission gamma de haute énergie coïncident avec ceux en rayons X. C'est la première preuve directe que les restes de supernovae accélèrent des particules jusqu'à des énergies de l'ordre de 100 téraélectronvolts, ce qui était soupçonné depuis longtemps.

Parallèlement, HESS a scruté le centre galactique, un environnement dense et violent, potentiellement riche en

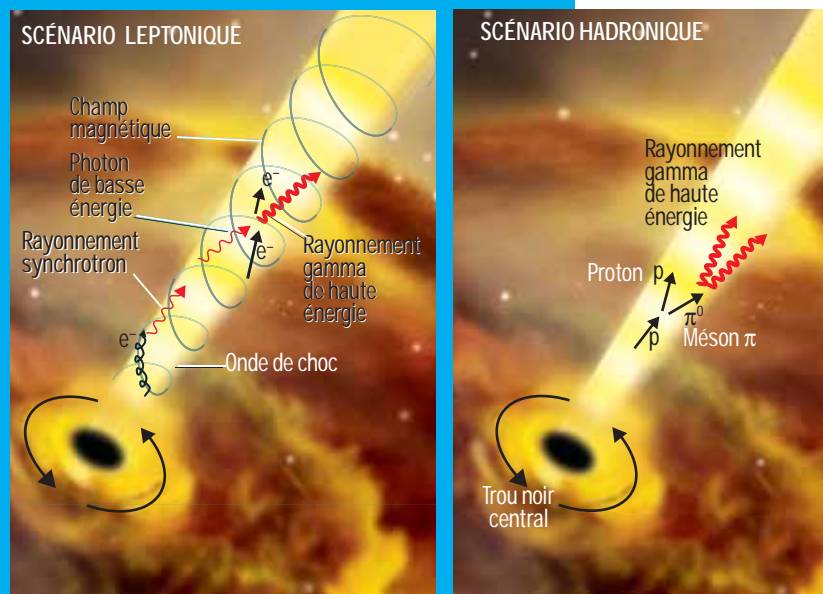
## L'origine des rayons gamma

Si l'on fait abstraction d'hypothétiques particules massives vestiges de l'Univers primordial susceptibles de s'annihiler, les rayons gamma dans le domaine du téraélectronvolt sont produits à partir de protons, de noyaux ou d'électrons accélérés à des énergies encore plus élevées. C'est essentiellement dans des ondes de choc et dans des milieux turbulents que des mécanismes efficaces d'accélération de particules chargées, connus sous le nom de mécanismes de Fermi, peuvent être à l'œuvre.

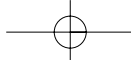
Dans les scénarios dits leptoniques, les électrons accélérés, fournissent un rayonnement gamma par émission Compton-inverse. Pour cela, ils doivent interagir avec un fond de photons de plus basse énergie, auxquels ils transmettent de l'énergie, et qu'ils transforment en photons gamma. Si le fond de photons de plus basse énergie impliqué dans le processus est lui-même dû au rayonnement synchrotron émis par les électrons relativistes en mouvement dans un champ magnétique, on parle d'émission synchrotron-self Compton. La même population d'électrons relativistes est à l'origine des deux types de rayonnement, synchrotron et Compton-inverse.

Dans les scénarios hadroniques, ce sont les protons relativistes qui sont responsables de l'émission gamma. Interagissant avec d'autres protons essentiellement du gaz d'hydrogène ambiant, ils produisent des mésons pi neutres, lesquels se désintègrent rapidement en émettant deux photons gamma.

On ignore encore lequel de ces deux types de scénarios domine le mécanisme d'émission gamma des diverses sources cosmiques observées dans le domaine des téraélectronvolts. Une réponse précise à cette question est l'un des enjeux des observations astronomiques par les télescopes Tcherenkov atmosphériques.



Deux scénarios sont envisagés pour expliquer la production de rayonnements gamma de très haute énergie dans les jets de blazars : le scénario leptonique (à gauche) et le scénario hadronique (à droite). Dans le premier, les électrons accélérés dans une onde de choc interagissent avec des photons de basse énergie, les propulsant dans le domaine gamma. Dans le second, des protons qui interagissent avec le gaz environnant donnent naissance à des mésons pi neutres qui se désintègrent en libérant des photons gamma de haute énergie.



sources gamma de très haute énergie. Les premières observations ont révélé une source brillante qui, à une trentaine de secondes d'arc près, peut être associée à l'environnement du trou noir supermassif tapi au centre de la Galaxie, Sgr A\*, ou à un reste de supernova, Sgr A Est. La stabilité de cette source durant ces deux dernières années plaiderait en faveur de la seconde hypothèse.

Une piste alternative a déjà pu être écartée. La région centrale pourrait abriter une concentration importante de « matière noire », et des théoriciens ont proposé que cette masse invisible fût constituée de neutralinos, d'hypothétiques particules massives, stables, neutres et interagissant faiblement. Les neutralinos sont leurs propres antiparticules et, en concentration suffisante, s'annihileraient en produisant des rayons gamma et des neutrinos de haute énergie. La découverte d'une source gamma intense et stable au centre galactique a donc soulevé l'espoir des théoriciens en physique des particules. Espoir vite déçu : si le signal observé était dû aux annihilations de neutralinos, ces derniers devraient avoir une masse supérieure à sept téraélectronvolts, ce qui est incompatible avec la théorie.

Des observations plus poussées du centre de notre Galaxie ont récemment révélé l'existence d'une émission supplémentaire diffuse, qui apparaît après soustraction de la source centrale intense et d'un reste de la supernova G0.9+0.1 (voir la figure 5). Corrélée avec les mesures d'un traqueur moléculaire autour du centre galactique, cette émission est sans doute due à l'interaction de rayons cosmiques particulièrement énergétiques avec les gigantesques nuages de gaz présents au cœur de la Galaxie.

Cette émission diffuse donne accès pour la première fois au spectre en énergie des rayons cosmiques près de leur source. En effet, le spectre des rayons gamma révèle indirectement celui des protons ou noyaux qui les ont produits. Ainsi, on constate que le spectre des rayons cosmiques mesuré au centre de notre Galaxie est plus riche en particules de haute énergie que ce qui est observé dans l'environnement terrestre. En effet, les particules chargées les plus énergétiques sont aussi les moins confinées par les champs magnétiques de la Galaxie et tendent à s'en échapper plus facilement.

Toutes les sources de rayons gamma de haute énergie ne se trouvent pas dans la Galaxie. Dans les années 1990,

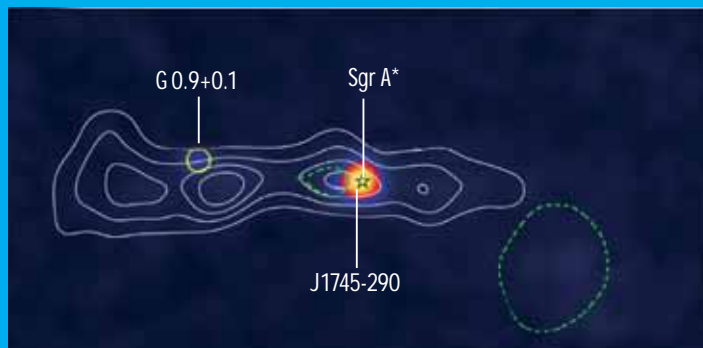
on a découvert quelques sources extragalactiques correspondant à des objets nommés blazars. Certaines galaxies elliptiques abritent en leur centre un trou noir de plus d'une centaine de millions de masses solaires, qui accrete la matière environnante et éjectent de gigantesques jets de plasma relativistes loin dans l'espace intergalactique (voir la figure 1).

## Le domaine extragalactique

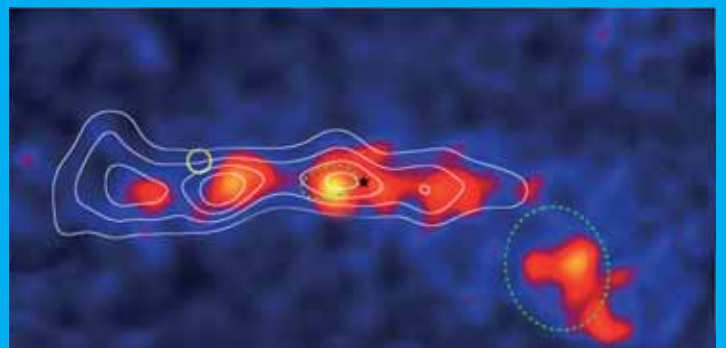
Dans le cas où l'axe des jets de ces « noyaux actifs de galaxies » est proche de la ligne de visée, la luminosité apparente est amplifiée jusqu'à plusieurs centaines de fois par des effets relativistes; le noyau actif est alors qualifié de blazar. L'Observatoire spatial Compton en a repéré une soixantaine dans le domaine d'énergie du gigaélectronvolts, mais la luminosité de la plupart d'entre eux, dans le domaine des très hautes énergies était beaucoup plus faible. De surcroît, ces sources, très variables, n'étaient détectées, aux très hautes énergies, que lors d'éruptions intenses.

L'échantillon de galaxies à noyaux actifs détectées à très haute énergie ne cesse de grandir. Cinq nouvelles sources de type blazars ont été découvertes, dont deux très éloignées, avec des décalages spectraux vers le rouge importants (supérieurs à 0,1). Un suivi soutenu et des campagnes d'observation simultanées à plusieurs longueurs d'onde ont été réalisés pour plusieurs sources brillantes tel le blazar PKS 2155-304, observable avec HESS même en dehors des périodes éruptives. L'analyse de ses variations de luminosité sur l'ensemble du spectre électromagnétique a permis de mieux contraindre les différents scénarios de production du rayonnement, à partir d'électrons ou de protons, bien que l'on ne puisse pas encore départager totalement ces scénarios. Par ailleurs, HESS a confirmé l'émission aux très hautes énergies de la galaxie active M87, une radiogalaxie (les jets sont vus sous un angle plus grand). De telles radiogalaxies, par exemple Centaurus A (voir la figure 6), sont nombreuses dans l'Univers et le résultat laisse penser que l'on détectera plusieurs nouvelles sources extragalactiques dans le domaine des téraélectronvolts.

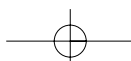
Outre son intérêt pour l'étude des galaxies actives, la détection aux très hautes énergies de noyaux actifs lointains offre un moyen d'estimer le fond de rayonnement infrarouge

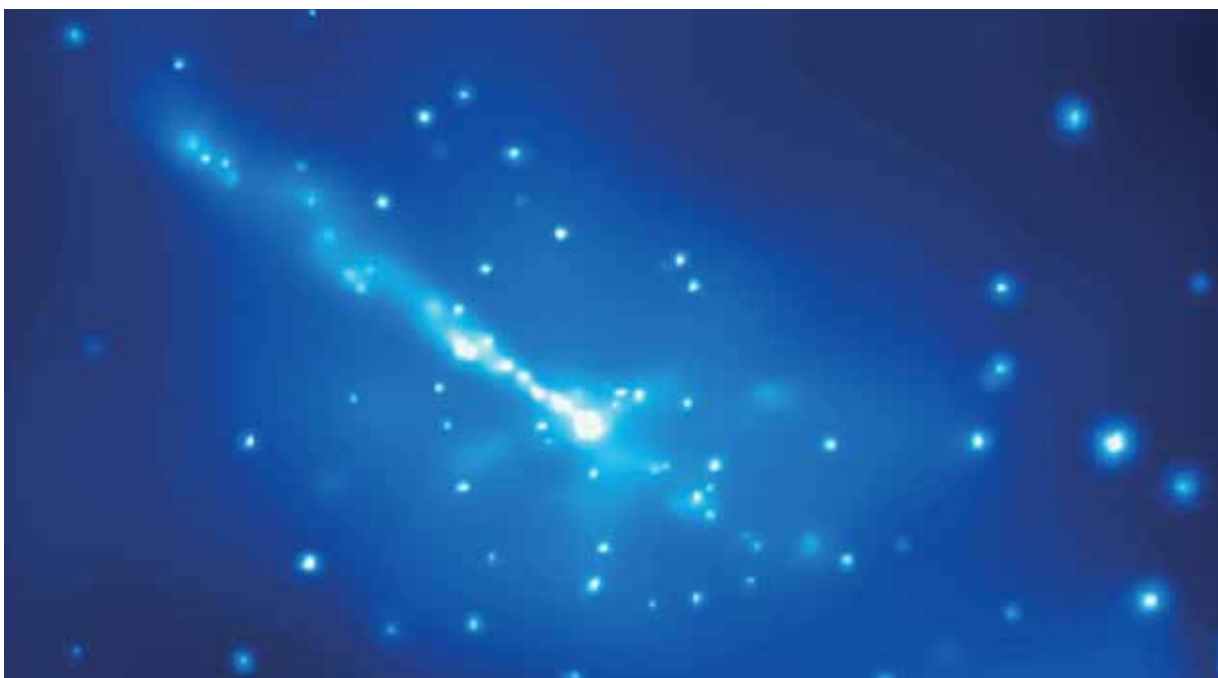


**5. Cartographie en rayonnement gamma de haute énergie** de la région centrale de notre Galaxie. On observe deux sources intenses, J1745-290, peut-être associée au trou noir du centre galactique Sgr A\*, et le reste de supernova G0.9+0.1. Ces deux sources sont telle-



ment intenses qu'elles masquent les autres émissions (à gauche). En soustrayant ces deux sources de l'image globale, les astronomes font apparaître une importante émission diffuse de haute énergie (à droite, corrélée aux nuages moléculaires indiqués par les contours blancs).





**6. Centaurus A** est une radiogalaxie proche, située à 10 millions d'années-lumière dans le ciel austral. Elle présente un jet très collimaté issu de son centre actif, cartographié ici en rayons X par le satellite CHANDRA. La multitude de phénomènes énergétiques en jeu dans de telles

radiogalaxies en fait d'excellents émetteurs potentiels aux très hautes énergies. Pour l'instant, une unique source de cette famille, la radiogalaxie proche M 87, a été effectivement détectée dans le domaine des téraélectronvolts.

extragalactique. L'univers est en effet baigné d'un rayonnement infrarouge venant de la lumière des galaxies, des étoiles et des poussières, qui absorbe en partie les photons gamma de très haute énergie sur leur trajet entre la source et la Terre. En comparant le rayonnement gamma observé et l'émission intrinsèque des sources (estimée à partir de modèles de rayonnement gamma des blazars) les scientifiques de la collaboration HESS ont déduit une valeur minimale pour le fond infrarouge extragalactique, compatible avec celle déduite par simple comptage de galaxies. L'espace extragalactique serait ainsi plus transparent que prévu pour les gamma de très haute énergie. Ce résultat, qui doit être confirmé, a des conséquences en cosmologie sur les scénarios de formation et d'évolution des galaxies.

Pourtant, en comparaison de la profusion de sources en rayonnement gamma de très haute énergie observées dans notre galaxie, l'espace extragalactique fait figure de parent pauvre. C'est sans doute provisoire, car selon certains modèles, la sensibilité de HESS est juste suffisante pour détecter des émetteurs potentiels aux très hautes énergies, tels les galaxies à flambée d'étoiles (théâtre d'explosion en masse de supernovae) ou des amas de galaxies (où les vents galactiques interagissant avec le gaz de l'amas peuvent former de gigantesques chocs et accélérer les particules).

Les performances atteintes par la technique d'imagerie Tcherenkov ont révolutionné l'astronomie gamma, en témoigne l'impressionnante richesse de résultats récoltés par HESS. Mentionnons les autres installations qui devraient obtenir prochainement des résultats complémentaires : CANGAROO (Japon-Australie), MAGIC (Europe) et VERITAS (États-Unis). De ces avancées émerge une vision renouvelée de la physique des accélérateurs cosmiques, qui offre des données observationnelles détaillées à une physique des très hautes énergies jusque-

là principalement théorique. L'association avec les observations réalisées à d'autres longueurs d'onde – rayons X, ondes radio et surtout rayons gamma de plus basse énergie – apporte aussi beaucoup à l'étude des phénomènes cosmiques énergétiques. Le futur immédiat de HESS va s'inscrire à l'interface du domaine des très hautes énergies et celui des hautes énergies exploré par d'autres instruments, tel le satellite GLAST de la NASA, dont le lancement est prévu en 2007 et qui couvrira un domaine s'étendant de 30 mégaelectronvolts à 300 gigaelectronvolts. Dans une deuxième phase prévue pour 2008, le réseau actuel de HESS sera enrichi d'un télescope supplémentaire de 28 mètres de diamètre équipé d'une caméra possédant 2048 photomultiplicateurs. Ce cinquième télescope, déjà en construction, observera les rayons gamma à partir de 20 gigaelectronvolts, et au-dessus de 50 gigaelectronvolts, les cinq télescopes pourront fonctionner en mode stéréoscopique. À plus long terme, conjointement avec les satellites gamma, de grands réseaux de télescopes Tcherenkov au sol, assureront une couverture spectrale complète du domaine des hautes énergies, cartographieront l'ensemble du ciel et exploreront plus profondément l'espace extragalactique.

**Bernard DEGRANGE** est directeur de recherches au CNRS/IN2P3, Laboratoire Leprince-Ringuet, à l'École Polytechnique, à Palaiseau. **Hélène SOL** est directrice de recherche au CNRS/INSU, Laboratoire Univers et Théories, à l'Observatoire de Paris, à Meudon.

F. AHARONIAN, *Very high energy cosmic gamma radiation*, World Scientific, 2004.

T. WEEKES, *Very high energy gamma-ray astronomy*, Series in Astronomy and Astrophysics, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003.

Site de l'expérience HESS:  
<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>