

d'énergie supérieure à 10^{19} électronvolts sont très peu déviés par les champs magnétiques de notre Galaxie. Si ces particules provenaient de notre Galaxie, leur répartition varierait selon la direction, car la Galaxie ne s'étend pas symétriquement autour de nous. Or, la répartition est isotrope.

Naissance dans les supernovae

Ce raisonnement montre à quel point les rayons cosmiques restent mystérieux. Les astrophysiciens ont émis des hypothèses sur les mécanismes de leur production, mais aucune n'est complètement satisfaisante. La difficulté tient en partie à la médiocre connaissance des conditions (très différentes de celles que l'on connaît sur la Terre) qui règnent dans les régions où naissent ces particules. Notamment, l'espace interstellaire ne contient qu'un atome par centimètre cube, une densité bien inférieure à celle du meilleur vide que l'on sache créer. En outre, dans ces régions, les champs électriques et magnétiques interagissent avec une population diffuse de particules char-

gées, encore moins nombreuses que les atomes neutres.

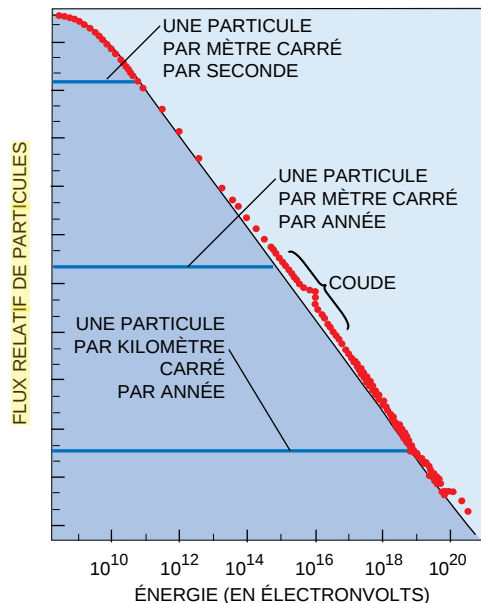
Ce milieu est moins calme qu'il n'y paraît : la matière est si rare que les forces électriques et magnétiques agissent sur de grandes distances sans être notablement amorties. Dans notre Galaxie, l'espace contient ainsi un plasma énergétique et turbulent, composé d'atomes partiellement ionisés. Les mouvements sont difficiles à détecter à l'échelle de temps humaine en raison des grandes distances qui nous en séparent, mais ces mêmes distances permettent à des forces modérées de produire des résultats impressionnants : une particule n'est habituellement accélérée que pendant quelques secondes dans les accélérateurs de particules, mais elle pourrait demeurer des années ou même des millénaires au sein d'un « accélérateur cosmique ».

Les astronomes pensent depuis longtemps que la majorité des rayons cosmiques – ceux dont l'énergie est inférieure à environ 10^{16} électronvolts – provient des supernovae, c'est-à-dire des explosions d'étoiles. En effet, la puissance totale des rayons cosmiques observés n'est que légèrement inférieure

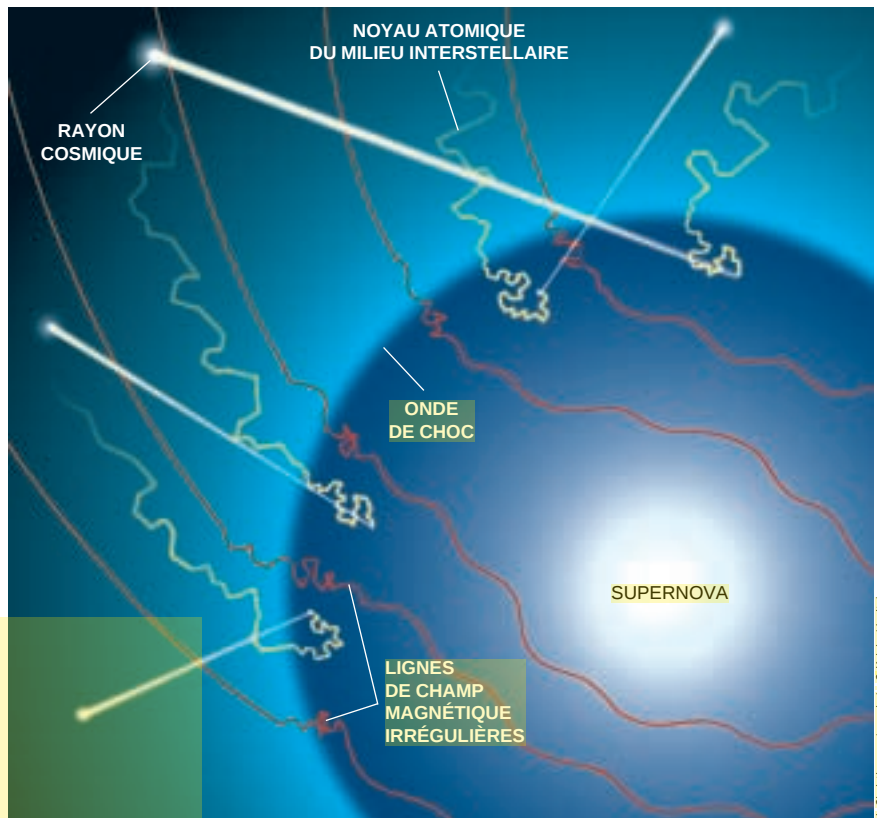
à celle libérée dans le milieu galactique par les supernovae, au nombre de trois par siècle en moyenne. Peu de sources ont cette puissance dans notre Galaxie.

Lors de l'effondrement d'une étoile massive, les couches externes de l'étoile sont éjectées à plus de 10 000 kilomètres par seconde. De même, une quantité considérable d'énergie est libérée lorsqu'une naine blanche se désintègre, lors d'une explosion thermonucléaire. Dans ces deux types de supernovae, la matière est éjectée à des vitesses supersoniques, ce qui crée une puissante onde de choc dans le milieu interstellaire. Cette onde de choc accélère les noyaux de la matière qu'ils traversent, les transformant en rayons cosmiques. Les rayons cosmiques étant électriquement chargés, ils ont des trajectoires tortueuses à travers les champs magnétiques interstellaires, de sorte que leur direction d'arrivée sur la Terre ne fournit aucune indication de leur origine.

En étudiant le rayonnement synchrotron parfois associé aux restes de supernovae, les astrophysiciens ont découvert des indications plus directes du rôle accélérateur des supernovae. Le rayonnement synchrotron est caracté-



1. LES SUPERNOVAE semblent être les accélérateurs de particules qui engendrent les rayons cosmiques. Lors de la traversée de l'onde de choc en expansion créée par l'éjection de matière des supernovae, les particules cosmiques gagnent un peu d'énergie. Les champs magnétiques environnants sont si irréguliers que les particules peuvent traverser l'onde de choc des centaines, voire des milliers de fois, jusqu'à ce qu'elle s'échappe sous la forme de rayons cosmiques. La plupart des noyaux seraient peu accélérés. Cette description est corroborée par la forme générale du spectre d'énergie des rayons cosmiques (à gauche), qui décroît lorsque l'énergie aug-



mente. Le « coude » dans la courbe indiquerait que la plupart des noyaux sont accélérés par un mécanisme incapable de fournir plus de 10^{15} électronvolts environ. Les noyaux ayant des énergies supérieures seraient produits par une source dont on ignore encore la nature.



B. Bolos, U.S. Army



University of Utah

2. CE RÉSEAU DE DÉTECTEURS DE GERBES ATMOSPHÉRIQUES épie les sous-produits des rayons cosmiques qui pénètrent la haute atmosphère. Les photodétecteurs (à droite) enregistrent les éclairs lumineux provoqués par les rayons cosmiques qui heurtent les atomes

d'azote de l'atmosphère. À partir de ces données, on détermine l'énergie et l'identité probable des rayons cosmiques incidents. Le réseau *Fly's Eye* se trouve dans le désert de l'Utah ; une nouvelle version de ce réseau couvrira 1 000 kilomètres carrés.

ristique d'électrons de haute énergie se propageant dans un champ magnétique intense, tel celui qui semble agir dans les accélérateurs de rayons cosmiques. Récemment, le satellite japonais ASCA d'observations en rayons X a photographié le reste de la supernova 1006, qui explosa voici 991 ans : contrairement au rayonnement provenant de l'intérieur du reste de la supernova, le rayonnement X de la sphère en expansion possède les caractéristiques d'un rayonnement synchrotron associé à des électrons accélérés jusqu'à 10^{14} électronvolts.

Avec le détecteur *EGRET*, embarqué à bord de l'Observatoire Compton, les astrophysiciens ont également étudié les sources ponctuelles de rayons gamma associées aux restes de supernovae. L'analyse des intensités et des spectres enregistrés (jusqu'à des énergies de un milliard d'électronvolts) montre que ces rayons gamma pourraient résulter de la désintégration de pions neutres, des particules qui seraient produites par la collision de rayons cosmiques émanant des restes de l'étoile détruite avec le gaz interstellaire avoisinant. Toutefois l'Observatoire de rayons gamma *Whipple*, au sol, n'a pas détecté de rayons gamma avec l'intensité attendue si les supernovae accéléraient des particules à 10^{14} électronvolts ou plus.

Pour savoir si les supernovae sont les sources des rayons cosmiques, on analyse également la nature des noyaux

d'atomes qui composent le rayonnement cosmique. La taille de l'orbite d'une particule chargée dans un champ magnétique étant proportionnelle à la quantité de mouvement totale par unité de charge, les noyaux plus lourds ont plus d'énergie que les noyaux légers, à dimensions d'orbite égales. Tout phénomène qui accélère les noyaux jusqu'à une dimension d'orbite donnée (telle la traversée d'une région accélératrice d'étendue limitée) conduira donc à un excès de noyaux plus lourds aux hautes énergies.

Accélération sélective

Pourrait-on aller plus loin et retrouver, dans la nature des noyaux accélérés, le type des supernovae accélératrices ? Par exemple, l'explosion d'une naine blanche accélérerait n'importe quel noyau peuplant le milieu interstellaire local, tandis qu'une supernova résultant de l'effondrement d'une étoile massive accélérerait surtout le vent stellaire, émis par les couches externes de l'étoile progénitrice avant son explosion. Dans ce dernier cas, les rayons cosmiques contiendraient plus de noyaux d'hélium, de carbone et plus de noyaux lourds.

Malheureusement, l'identité des rayons cosmiques de haute énergie est perdue lors de leur interaction avec les atomes de l'atmosphère terrestre : la collision les transforme en une gerbe de particules secondaires. Pour être cer-

tain de la composition nucléaire des rayons cosmiques, on doit détecter les rayons cosmiques avant qu'ils n'interagissent avec l'atmosphère dense. La collecte de 100 rayons cosmiques d'énergie proche de 10^{14} électronvolts requiert un détecteur de 10 mètres carrés en orbite trois ans durant ; or, aujourd'hui, les expositions habituelles ne sont que de un mètre carré pendant trois jours.

Les astrophysiciens contournent cette difficulté de plusieurs façons. Par exemple, la NASA a mis au point des ballons stratosphériques qui embarquent des charges utiles lourdes (environ trois tonnes) pendant plusieurs jours (ces expériences sont beaucoup moins onéreuses que l'envoi de détecteurs dans des satellites). Les vols les plus fructueux ont eu lieu en Antarctique, où les vents de haute altitude soufflent en cercle autour du pôle Sud.

Une charge utile lancée du détroit de McMurdo, sur la côte antarctique, parcourt un cercle de rayon presque constant autour du pôle et revient près de son point de départ. En 1996, certains ballons ont tourné autour du pôle pendant dix jours. L'un d'entre nous (S. Swordy) collabore avec Dietrich Müller et Peter Meyer, de l'Université de Chicago, pour construire un détecteur de dix mètres carrés qui mesurera des rayons cosmiques lourds d'énergie atteignant 10^{15} électronvolts, lors d'un tel vol. Simultanément, des collègues cherchent à porter les temps

d'exposition à une centaine de jours, au cours de vols semblables, mais plus près de l'équateur.

De grandes gerbes de particules

L'étude des rayons cosmiques d'énergie encore supérieure – ceux produits par des sources inconnues – requiert de grands détecteurs au sol, qui surmontent le problème des faibles flux en surveillant des surfaces collectrices considérables pendant des mois, voire des années. Cependant, l'information doit être extraite des gerbes de particules secondaires – des électrons, des muons et des rayons gamma – engendrées à haute altitude, dans l'atmosphère, par la collision des noyaux incidents et des atomes de l'atmosphère. Ces méthodes indirectes ne donnent que des indications statistiques sur la composition des rayons cosmiques ; elles n'identifient pas directement les noyaux incidents.

Au sol, les millions de particules secondaires créées par chaque rayon cosmique se dispersent sur plusieurs centaines de mètres de diamètre. Comme aucun détecteur n'a une telle surface, on place quelques centaines de détecteurs espacés de plusieurs mètres.

Les détecteurs récemment mis au point, qui collectent des données de plus en plus précises, permettent de mieux interpréter les gerbes. Par exemple, l'expérience *CASA-MIA-DICE*, à laquelle deux d'entre nous participent (J. Cronin et S. Swordy), dans l'Utah, mesure les répartitions d'électrons et de muons au sol. Elle détecte aussi la lumière Cerenkov (due aux particules dont les vitesses sont supérieures à la vitesse de la lumière dans l'atmosphère) engendrée par les particules de la gerbe à diverses altitudes, dans l'atmosphère. Ces données nous permettent de reconstruire la forme de la gerbe avec plus de certitude et, donc, de mieux préciser l'énergie et l'identité du rayon cosmique qui a formé cette gerbe.

T. Gaisser, de son côté, utilise un réseau de détecteurs pour mesurer les gerbes qui atteignent le sol, au pôle Sud. Il compare ses données avec celles de l'expérience *AMANDA*, qui détecte les muons de haute énergie produits dans les mêmes gerbes, par observation du rayonnement Cerenkov engendré en profondeur dans la calotte polaire. L'expérience *AMANDA*



3. CE BALLON STRATOSPHERIQUE, lancé près de la base McMurdo, dans l'Antarctique, emporte un détecteur qui détectera directement les rayons cosmiques avant qu'ils ne créent des particules par collisions avec les atomes de l'atmosphère. À 40 kilomètres au-dessus de la calotte

cherche surtout à repérer les traces des neutrinos cosmiques qui engendrent des gerbes ascendantes après avoir traversé la Terre.

Simultanément, les physiciens perfectionnent des modélisations numériques des gerbes atmosphériques. Ces simulations révèlent les possibilités et les limitations des mesures effectuées au sol. La détection directe de rayons cosmiques d'énergie supérieure devrait compléter ces mesures.

Hautes énergies

Les rayons cosmiques d'énergie supérieure à 10^{20} électronvolts sont très rares : chaque kilomètre carré d'atmosphère terrestre n'en reçoit qu'un par siècle. Aussi leur étude nécessite-t-elle un détecteur de gerbes atmosphériques de dimension gigantesque. Outre l'événement observé en 1991 dans l'Utah, des particules d'énergie supérieure à 10^{20} électronvolts ont été observées par d'autres groupes aux États-Unis, à Akeno (au Japon), à Haverah Park (au Royaume-Uni) et à Yakoutsk (en Sibérie).

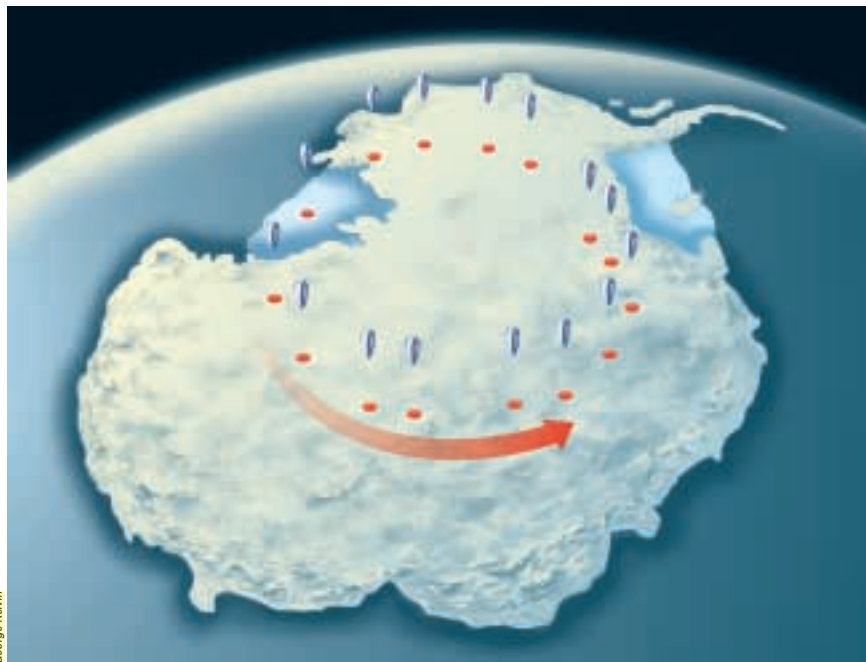
L'existence même de particules si énergétiques est paradoxale : d'une part, elles naissent très probablement en dehors de notre Galaxie, car aucun mécanisme d'accélération connu ne pourrait les produire dans la Voie lactée et parce qu'elles arrivent de

manière équivalente de toutes les directions ; d'autre part, leur source ne peut être éloignée de plus de 30 millions d'années-lumière (le diamètre du disque de notre Galaxie est de 100 000 années-lumière environ), sans quoi les particules auraient perdu leur énergie par interaction avec le fond diffus cosmologique, rayonnement fossile du Big Bang.

Si les sources de ces particules de très haute énergie étaient uniformément réparties dans l'Univers, l'interaction avec le rayonnement fossile ferait chuter le nombre de particules d'énergie supérieure à 5×10^{19} électronvolts, mais tel n'est pas le cas. Nous avons aujourd'hui observé trop peu de tels rayons cosmiques énergétiques pour savoir avec certitude d'où ils viennent, mais la poursuite de leur observation devrait être éclairante : comme ces rayons ne sont presque pas déviés par les faibles champs magnétiques galactiques, la mesure de leur direction de propagation pourrait révéler leur origine.

Quelles pourraient être les sources des rayons cosmiques les plus énergétiques ? Trois possibilités sont avancées : les disques d'accrétion autour de trous noirs galactiques, les zones de sursauts gamma, et les défauts topologiques de l'espace-temps.

Les astrophysiciens pensent que des trous noirs de un milliard de masses



George Kévin

polaire, les vents qui soufflent en cercle autour du pôle ont ramené le ballon près de son point de départ après une dizaine de jours. Les détecteurs embarqués sur des ballons sont moins sensibles que ceux dont on équipe les satellites, mais ils sont plus grands et moins onéreux.

solaires ou plus, qui attirent la matière dans les noyaux actifs de galaxies, émettent des jets dans l'espace intergalactique, à des vitesses approchant celle de la lumière ; de tels jets ont été observés à l'aide de radiotélescopes. Peter Biermann et ses collègues de l'Institut de radioastronomie de Bonn supposent que les points chauds observés dans les lobes radios sont des ondes de choc qui accélèrent des rayons cosmiques ; or des rayons cosmiques de très haute énergie semblent provenir des radiogalaxies.

D'autre part, les sursauts gamma demeurent des phénomènes mystérieux qui seraient créés par des explosions résultant de la collision et de la fusion d'étoiles à neutrons. Mario Vietri, de l'Observatoire astronomique de Rome, et Eli Waxman, de l'Université Princeton, ont remarqué un accord approximatif entre l'énergie libérée par de tels événements et celle qui serait nécessaire pour alimenter le flux observé des rayons cosmiques de haute énergie. Ils supposent que les chocs très violents dus à ces explosions agissent comme des accélérateurs cosmiques.

Enfin quelques astrophysiciens envisagent que les rayons cosmiques très énergétiques proviennent de la désintégration de monopôles, de cordes cosmiques, de murs cosmiques ou d'autres défauts topologiques qui seraient apparus au début de l'Uni-

vers. Ces objets sont de formidables réservoirs d'énergie, des vestiges de l'Univers primordial, lorsque la force de gravité, la force électromagnétique et les forces nucléaires faible et forte étaient encore unifiées.

Lors d'un effondrement de ces réservoirs et d'une «brisure de symétrie» (c'est-à-dire une différenciation des divers types de forces à partir de la force unifiée), l'énergie emmagasinée s'échapperait sous la forme de particules très massives, qui se désintégreraient immédiatement en jets de particules dont l'énergie serait 100 000 fois supérieure à celle des rayons cosmiques les plus énergétiques connus. Dans cette hypothèse, les rayons cosmiques de très haute énergie que nous observons seraient les produits léthargiques de cascades cosmologiques de particules.

On cherche aujourd'hui à observer assez de ces rayons cosmiques pour identifier les objets extragalactiques dont ils proviennent. Le réseau AGASA, au Japon, surveille ainsi 200 kilomètres carrés à la surface du Globe, et la nouvelle expérience à haute résolution *Fly's Eye*, dans l'Utah, couvrira environ 1 000 kilomètres carrés. Chaque détecteur, cependant, ne détectera que quelques noyaux énergétiques par an.

Ces dernières années, J. Cronin et Alan Watson, de l'Université de Leeds,

ont proposé un projet international afin d'accumuler les données. Dans ce projet de l'«Observatoire Auger» (du nom de Pierre Auger, le physicien français qui, le premier, étudia les gerbes de particules issues de rayons cosmiques), deux réseaux de détecteurs (un par hémisphère) couvriraient une surface équivalant à 9 000 kilomètres carrés et enregistreraient alors des centaines d'événements de très haute énergie par an. Chaque réseau se composerait de 1 600 stations réparties tous les 1,5 kilomètre ; une seule gerbe pourrait être détectée par plusieurs dizaines de stations.

Au cours d'un colloque qui s'est tenu au Laboratoire Fermi, en 1995, les astrophysiciens ont envisagé la réalisation d'un tel observatoire à l'aide de systèmes déjà commercialisés : panneaux solaires, téléphones cellulaires, récepteurs GPS... Chaque réseau, aussi grand qu'un département français, pourrait être construit pour environ 200 millions de francs.

Alors que les astrophysiciens envisagent la construction et la gestion de réseaux de détecteurs aussi gigantesques, la question fondamentale demeure : existe-t-il des rayons cosmiques à des énergies encore supérieures, ou avons-nous commencé à détecter les particules les plus énergétiques que l'Univers puisse engendrer ?

James CRONIN, professeur de physique à l'Université de Chicago, a reçu le prix Nobel de physique en 1980 pour son travail sur les violations de symétrie lors de la désintégration des mésons. Thomas GAISSER est professeur de physique à l'Université du Delaware. Simon SWORDY est professeur à l'Université de Chicago.

Jean-Noël CAPDEVIELLE, *Les rayons cosmiques*, collection Que sais-je ?, éditions des Presses universitaires de France, 1984.

Pierre SOKOLSKY, *Introduction to Ultra-high Energy Cosmic Ray Physics*, Addison-Wesley, 1988.

Thomas K. GAISSER, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, 1992.

Simon SWORDY, *Cosmic Ray Observations below 10^{14} eV*, in *Proceedings of the XXIII International Cosmic Ray Conference*, sous la direction de D.A. Leahy, R.B. Hicks et D. Venkatesan, World Scientific, 1994.