

Les rayons cosmiques d'énergie extrême

L'une des grandes énigmes de l'astrophysique moderne

Olivier Deligny (deligny@ipno.in2p3.fr) et Tiina Suomijärvi (tiina@ipno.in2p3.fr)
 Institut de Physique Nucléaire, CNRS/IN2P3 & Université Paris Sud XI-Orsay, 91406 Orsay cedex

Certaines particules provenant du cosmos transportent autant d'énergie qu'une balle de tennis frappée par les meilleurs joueurs. D'où viennent ces rayons cosmiques, et comment sont-ils accélérés à de telles énergies ? Ces questions ont motivé la construction du plus grand détecteur jamais conçu : l'Observatoire Pierre Auger, en Argentine.

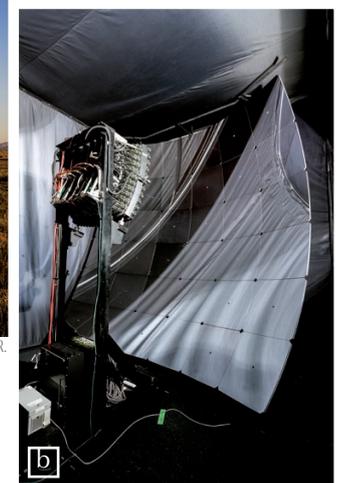
Cet observatoire, couvrant une surface de 3000 km² afin de compenser au mieux la faiblesse du flux de ces particules de l'extrême, a permis de répondre à de nombreuses questions que soulevait leur existence. Même si leur origine exacte nous échappe encore, les données qui seront collectées dans la future configuration de l'Observatoire pourraient nous permettre de percer les secrets des accélérateurs naturels les plus puissants de l'Univers.



1. L'Observatoire Pierre Auger.

(a) Une cuve à effet Cherenkov de 3,6 m de diamètre contenant 12 000 litres d'eau purifiée.

(b) Un télescope à fluorescence, avec son miroir d'une surface de 13 m² et sa camera avec 440 pixels constitués de photomultiplicateurs.



Les rayons cosmiques ont été découverts il y a une centaine d'années, en 1912, par Victor Hess. En montant avec ses instruments à bord d'un ballon rempli d'hydrogène pour s'élever jusqu'à 5000 mètres d'altitude (sans dispositif d'assistance respiratoire !), il mesura le taux d'ionisation en fonction de l'altitude : le taux décroît jusqu'à 700 mètres, puis croît au-delà. Cette expérience fondamentale, suivie un an plus tard par celle de Werner Kolhörster (dont le ballon atteignit l'altitude de 9300 mètres), montra que le rayonnement ionisant observé jusqu'alors au niveau du sol provenait de l'espace extra-terrestre et non de la radioactivité naturelle des éléments présents sur Terre. Plus tard, en 1938, Pierre Auger montra que certains rayons cosmiques très énergétiques génèrent dans l'atmosphère des cascades de particules secondaires, s'étalant sur de très grandes surfaces au niveau du sol, cascades appelées *grandes*

gerbes atmosphériques (voir encadré 1, p. 32). Il en déduisit l'existence de rayons cosmiques transportant des énergies de l'ordre de 10¹⁵ eV (électron-volts).

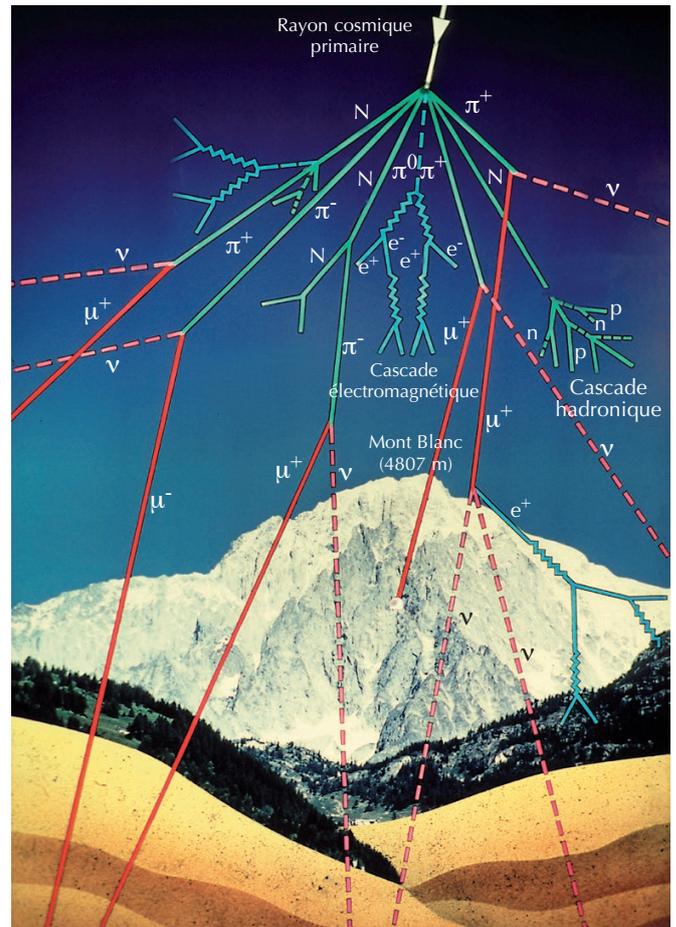
Depuis, des rayons cosmiques encore plus énergétiques ont été observés, et nous savons aujourd'hui que certains d'entre eux peuvent acquérir des énergies supérieures à 10²⁰ eV. Ils sont les messagers des phénomènes les plus violents se produisant dans certaines conditions extrêmes opérant dans l'Univers (voir encadré 2, p. 34). Mais leur origine demeure l'une des grandes questions auxquelles est confrontée l'astrophysique moderne. Les données collectées au-delà de ~ 10¹⁷ eV à l'Observatoire Pierre Auger depuis une dizaine d'années ont cependant permis de répondre à de nombreuses questions, et fournissent aujourd'hui une vue d'ensemble sur la nature et l'origine des rayons cosmiques les plus énergétiques provenant de la Galaxie et d'au-delà.

»»»

Une gerbe atmosphérique est une cascade de particules produite lorsqu'un rayon cosmique pénètre dans l'atmosphère (fig. E1). Pour un rayon cosmique tel qu'un proton ou un noyau de masse atomique A (avec $A \leq 56$, car les noyaux plus lourds que le fer ne sont pas assez abondants), la première interaction est hadronique et se produit dans la haute atmosphère, à environ 20 kilomètres d'altitude au-dessus du niveau de la mer. Cette première interaction produit un grand nombre de particules secondaires, principalement des pions, qui engendrent eux-mêmes d'autres interactions hadroniques : c'est toute une *cascade hadronique* qui est donc générée dans les premières couches de l'atmosphère. Les pions neutres se désintègrent en photons, qui peuvent produire des paires électron-positron tant que leur énergie est suffisante, et les électrons et positrons peuvent eux-mêmes produire des photons par rayonnement Bremsstrahlung : c'est toute une *cascade électromagnétique* qui est générée et qui se propage jusqu'au niveau du sol sur des surfaces allant jusqu'à quelques kilomètres carrés. Par ailleurs, la cascade hadronique s'éteint lorsque l'énergie des pions chargés est telle que ces derniers se désintègrent avant de pouvoir interagir. Cela se passe à une altitude d'environ 6 kilomètres au-dessus du niveau de la mer. Des muons sont alors produits avec une énergie de quelques GeV (10^9 eV), et peuvent se propager jusqu'au sol en grand nombre : c'est la *cascade muonique* des gerbes. Cette cascade reste relativement concentrée autour de l'axe de la gerbe.

La cascade de réactions en chaîne provoquée à la suite de la collision d'un rayon cosmique avec une molécule de l'atmosphère se manifeste par deux effets mesurables. D'une part, aux ultra-hautes énergies ($> 10^{18}$ eV), la cascade laisse une empreinte de plusieurs dizaines de milliards de particules secondaires (essentiellement des photons, des électrons/positrons et des muons) au niveau du sol, empreinte s'étendant sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Grâce à un réseau de capteurs mesurant le nombre de particules par unité de surface en seulement quelques points, il est possible de reconstruire le profil *latéral* de la gerbe en ajustant des courbes théoriques sur les points de mesures. Ces courbes sont paramétriques, et l'un de ces paramètres est la *taille* de la gerbe, qui n'est autre que le signal attendu à une distance fixe du pied de gerbe. Cette distance est soigneusement choisie de sorte à être le meilleur compromis pour minimiser les fluctuations de signal attendues près du pied de gerbe en raison des fluctuations du point de première interaction dans l'atmosphère, et celles attendues loin du pied de gerbe en raison des fluctuations du faible nombre de particules. Une fois déterminée, la taille de la gerbe est un bon indicateur de l'énergie du rayon cosmique primaire. Par ailleurs, les temps de déclenchement des capteurs au sol permettent de remonter à la direction d'arrivée du rayon cosmique, en ajustant ces temps sur le passage d'une « galette » représentant le front de gerbe se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, c .

D'autre part, les électrons/positrons de la gerbe déposent une partie de leur énergie dans l'atmosphère, en ionisant les molécules d'azote et d'oxygène. Celles-ci, dans leur désexcitation, émettent dans l'ultraviolet une faible lumière, dite de fluorescence. De manière simplifiée, la gerbe vue par un détecteur optoélectronique (des tubes photomultiplicateurs) sera similaire à une ampoule de quelques dizaines de watts émettant une lumière d'intensité variable dans l'ultraviolet et traversant le ciel à une vitesse proche de c . Le suivi des photons détectés en fonction de l'altitude permet ainsi de tracer le profil *longitudinal* des gerbes. La profondeur atmosphérique X_{\max} correspondant à l'épaisseur d'air traversée et exprimée en g/cm^2 , où



E1. Chaîne de désintégration d'un rayon cosmique de haute énergie dans l'atmosphère. N : noyau atomique ; p : proton ; n : neutron ; e^- : électron ; e^+ : positron ; γ : photon ; μ^+ , μ^- : muons ; π^0 : pion neutre ; π^+ , π^- : pions chargés. Version modifiée d'une figure originale du CERN

le nombre de photons détectés est maximum, revêt une importance particulière, car elle constitue le meilleur indicateur de la composition du rayon cosmique primaire. D'autre part, l'observation de ce profil permet de mesurer également l'énergie E du rayon cosmique primaire de manière quasiment *calorimétrique*, en intégrant ce profil et en prenant en compte la fonction de transmission des photons depuis l'origine de la gerbe jusqu'au détecteur.

La composante muonique des gerbes recèle également beaucoup d'informations. Pour des rayons cosmiques de même énergie mais de compositions différentes, le nombre total de muons N_μ diffère significativement et constitue donc aussi, en principe, un bon indicateur pour déterminer la nature du rayon cosmique primaire à l'origine de la gerbe. Par ailleurs, le spectre en énergie des muons ainsi que leur répartition autour de l'axe de la gerbe peuvent en principe renseigner sur les premières interactions hadroniques ayant lieu dans les premiers étages de cette gerbe dans la haute atmosphère, interactions modélisées à partir d'extrapolations de résultats obtenus dans des accélérateurs de particules tels que le LHC au CERN. Cependant, il est encore aujourd'hui difficile de séparer les composantes électromagnétique et muonique des gerbes au niveau du sol, et ainsi de mesurer N_μ . Une telle mesure est une des motivations pour opérer l'*upgrade* de l'Observatoire (voir p. 36).

L'Observatoire Pierre Auger

En raison de la faiblesse du flux des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (moins d'une particule par kilomètre carré et par siècle !), il a fallu voir grand afin de pouvoir recueillir le maximum de ces précieux oracles. L'Observatoire Pierre Auger, ainsi nommé en l'honneur du pionnier français, est un ensemble de détecteurs répartis sur une surface de 3000 kilomètres carrés sur la plaine des hauts plateaux de la Pampa Amarilla, en Argentine. Cet observatoire allie deux techniques complémentaires de détection des grandes gerbes atmosphériques (voir encadré 1) : un réseau de détecteurs de particules au niveau du sol afin d'échantillonner le profil latéral des gerbes, c'est-à-dire le nombre de particules traversant une surface donnée à une certaine distance du pied de gerbe, et des télescopes à fluorescence échantillonnant leur profil longitudinal, c'est-à-dire le nombre de particules en fonction de l'altitude.

Les détecteurs de particules sont des cuves remplies d'eau, utilisant l'effet Cherenkov : en pénétrant dans l'eau de ces cuves, les particules chargées ultra-relativistes issues des gerbes atmosphériques, telles que les électrons/positrons et muons, rayonnent par effet Cherenkov, car leur vitesse est supérieure à la célérité des ondes électromagnétiques dans l'eau (notons que les nombreux photons de haute énergie issus des gerbes sont aussi détectés par ce procédé de manière indirecte, en profitant du fait qu'ils produisent des paires électron-positron lorsqu'ils pénètrent dans l'eau). Ce rayonnement est détecté par des photomultiplicateurs placés dans les cuves. Une photographie d'une de ces cuves est montrée sur la figure 1a. La première cuve a été installée en février 2000. Depuis, 1660 détecteurs identiques, espacés tous les 1,5 kilomètre, ont été déployés et opèrent avec un cycle de service quasi permanent.

L'autre technique de détection des gerbes repose sur des matrices de plusieurs centaines de capteurs photosensibles qui, grâce à un jeu de miroirs de télescope, surveillent chacun une petite portion du ciel. Ces capteurs détectent la fluorescence provoquée par la désexcitation des molécules d'azote à la suite de leur excitation par les nombreux électrons d'ionisation créés lors du passage dans l'atmosphère de la cascade électromagnétique des gerbes. Cette désexcitation donne lieu à un rayonnement ultraviolet très faible (équivalent à

l'énergie émise par une lampe de quelques dizaines de watts), mais que l'on arrive à déceler jusqu'à 30 ou 40 kilomètres de distance pendant des nuits sans lune. Au total, 27 télescopes identiques à celui montré sur la figure 1b sont répartis sur 5 sites, et sont orientés de manière à surplomber le réseau de détecteurs de particules.

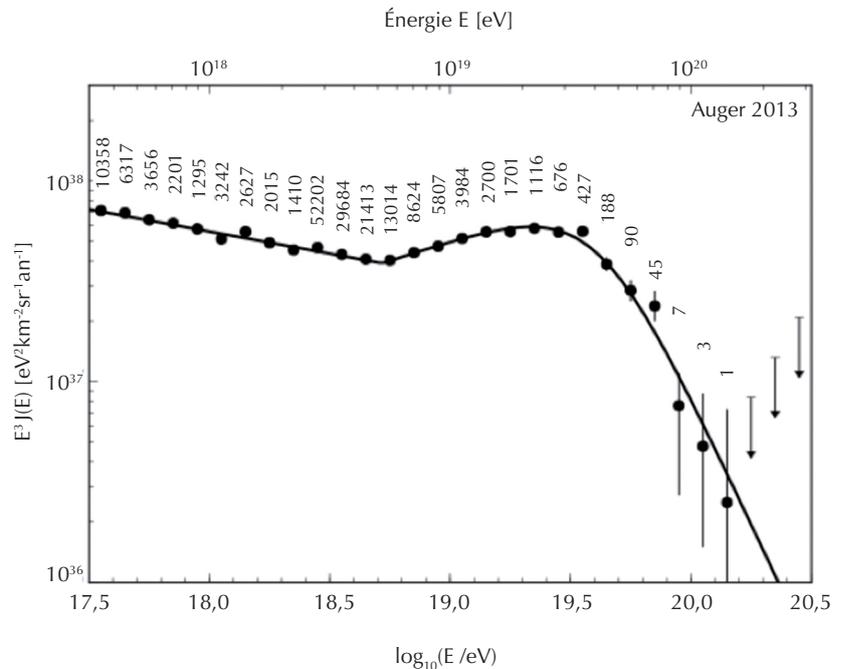
L'utilisation combinée des détecteurs au sol et des détecteurs de fluorescence permet d'accéder avec une grande précision aux caractéristiques des rayons cosmiques primaires (voir encadré 1).

La collaboration Auger est internationale, et comprend actuellement environ 500 chercheurs de 18 pays. La construction de l'Observatoire, qui avait démarré en 2001, a été terminée en juin 2008. Les équipes françaises y ont joué un rôle important, en particulier dans la conception et la réalisation de l'électronique des détecteurs de particules et dans le système d'acquisition et de transmission des données. Celles-ci sont transférées au centre de calcul de l'IN2P3 à Lyon, où elles sont disponibles pour l'analyse par les membres de la collaboration.

Les enseignements de l'Observatoire Pierre Auger

Le spectre des rayons cosmiques mesuré à l'aide des données de l'Observatoire Auger est représenté sur la figure 2, multiplié par l'énergie au cube afin de discerner plus clairement sa structure. Deux caractéristiques sont frappantes : une rupture de pente autour de 5×10^{18} eV, et une coupure du flux une décade en énergie plus haut. La rupture de pente, appelée *cheville*, est généralement considérée comme une signature spectrale marquant la transition entre l'extinction des rayons cosmiques d'origine galactique (qui dominent aux énergies inférieures à celle de la cheville) et l'apparition de la composante extragalactique (jusque-là sous-dominante) pour des énergies supérieures.

Les champs magnétiques présents dans la Galaxie, de l'ordre du microgauss, courbent tellement la trajectoire des particules qu'ils empêchent l'identification directe des sources des rayons cosmiques par leurs directions d'arrivée. Néanmoins, pour des énergies supérieures à 10^{18} eV, la rigidité des trajectoires des particules devient suffisamment grande pour que certains



2. Spectre en énergie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie mesuré à l'Observatoire Pierre Auger. Le flux $J(E)$ (nombre de particules par unité d'énergie, de surface et d'angle solide, et par an) est multiplié par l'énergie au cube, afin de mieux discerner les structures du spectre. Les chiffres placés au-dessus de chaque mesure du flux indiquent le nombre d'événements détectés dans chaque intervalle d'énergie.



E2. La galaxie Centaurus A, observée en UV par le spectrographe FORS2 du télescope VLT de l'ESO, au Chili. Centaurus A est une des galaxies à noyau actif les plus proches de nous, située à 13 millions d'années-lumière de la Terre, avec un trou noir, dont la masse est évaluée à environ 50 millions de fois la masse solaire, au centre, et des jets de plasma susceptibles d'accélérer des rayons cosmiques.

De nombreux phénomènes astrophysiques mettent en jeu des gaz de plasma, c'est-à-dire des nuages d'ions en mouvement qui ont la propriété d'être accompagnés de champs magnétiques turbulents. Ces nuages de plasma et leurs champs turbulents agissent vis-à-vis des particules chargées comme une raquette de tennis sur une balle : quand la balle et la raquette ont des mouvements en sens opposés, la balle repart avec une vitesse plus grande après la frappe. Ce mécanisme d'accélération, nommé « mécanisme de Fermi », est invoqué pour expliquer l'accélération des particules dans des objets astrophysiques.

Les galaxies dites « à noyau actif » (fig. E2) sont des exemples d'objets assez violents pour accélérer des particules aux énergies extrêmes. Leur cœur abrite un trou noir supermassif, pouvant atteindre un milliard de masses solaires. Un tel monstre absorbe des torrents de gaz et des amas de matière, avec un débit de plusieurs masses solaires par an. La matière qui tombe dans le centre galactique s'enroule autour de lui en un disque de plasma très chaud, parcouru par des champs magnétiques intenses. Certains disques d'accrétion peuvent produire des jets, sortes de paires de faisceaux de matière se mouvant extrêmement rapidement et émergeant près du disque. Les rayons cosmiques pourraient être accélérés dans de tels jets.

Un autre phénomène astrophysique de très grande violence est aussi mis en avant : les « sursauts gamma ». Ceux-ci ont été découverts au début des années 60. Deux ou trois fois par jour, les astronomes constatent de brèves explosions de rayons gamma quelque part dans le ciel. Les sources de ces explosions sont réparties uniformément sur la voûte céleste, ce qui semble indiquer qu'elles sont distribuées de façon homogène dans tout l'Univers. Si tel est le cas, la plupart des sursauts observés doivent être produits par des événements qui ont eu lieu à d'énormes distances (plusieurs milliards d'années-lumière) ; l'on en déduit que, pour être détectables, ils ont dû mettre en jeu des énergies considérables. Selon certains modèles, un sursaut émet en quelques millièmes de seconde une quantité d'énergie équivalente à celle que l'on obtiendrait en transformant en rayonnement la totalité de la masse du Soleil.

Il existe donc dans l'Univers des phénomènes violents pouvant accélérer des rayons cosmiques à des énergies colossales. Néanmoins, le mécanisme à l'œuvre pour accélérer des rayons cosmiques à des énergies de l'ordre de 10^{20} eV reste encore à identifier.



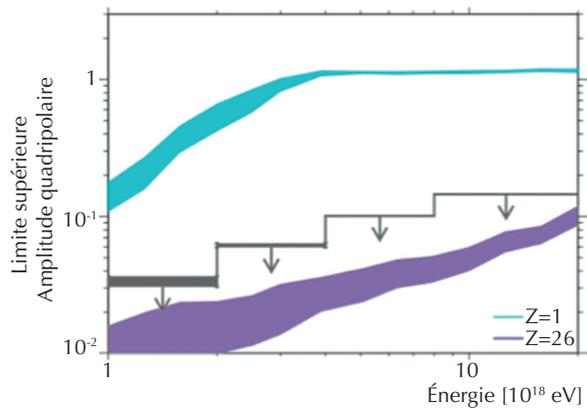
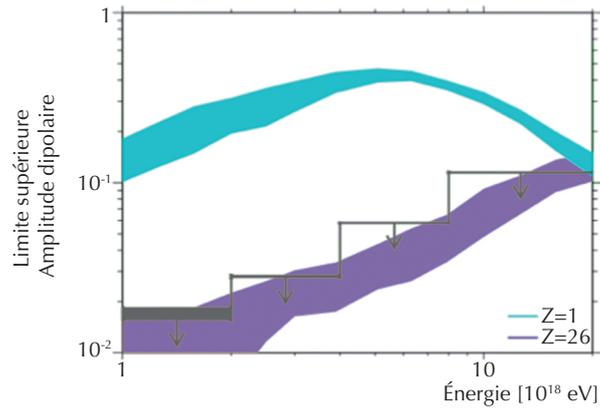
motifs puissent apparaître dans les directions d'arrivée étudiées à grande échelle. Pour des sources distribuées préférentiellement dans le disque de la Galaxie par exemple, des excès d'anisotropie dipolaire et quadripolaire sont des signatures génériques de la position excentrée du système solaire dans la galaxie. Mais, dans la limite des sensibilités actuelles, de telles anisotropies n'ont pas été observées comme on peut le voir sur la figure 3, alors qu'elles auraient dû l'être de manière significative pour des protons.

Il est intéressant de souligner que les résultats récents obtenus à l'Observatoire en termes de composition indiquent justement une présence majoritaire de protons, avec une présence minoritaire de noyaux du groupe carbone-azote-oxygène. Ces observations pourraient donc signifier que les protons proviennent de sources distribuées de manière plus ou moins isotrope en dehors de la Galaxie, ce qui pourrait expliquer plus naturellement le fort niveau d'isotropie observé autour de 10^{18} eV. Mais une telle explication soulève alors une autre question : si les rayons cosmiques sont déjà majoritairement d'origine extragalactique à des énergies inférieures à celle de la cheville, quelle est alors l'origine de la cheville ? Ainsi, comprendre comment s'opère la transition entre rayons cosmiques galactiques et extragalactiques, et quelle est l'origine de la cheville, sont des questions de grande actualité dans le domaine. Des caractérisations des distributions angulaires à grande échelle en fonction de la masse sont ici nécessaires, afin d'identifier l'origine de chaque composante.

L'autre caractéristique frappante du spectre montré sur la figure 2 est la coupure du flux observée au-delà de $\approx 5 \times 10^{19}$ eV. Les travaux fondateurs de Greisen, Zatsepin et Kuzmin (GZK) dans les années 60 avaient prédit ce genre de coupure dans cette gamme d'énergie (*ultra-hautes énergies* dans le jargon), en raison de l'interaction des protons extragalactiques avec le rayonnement du fond diffus cosmologique (voir encadré 3, p. 36). Par la suite, d'autres travaux montrèrent qu'une coupure semblable était aussi attendue pour des noyaux plus lourds. Une telle interprétation de la coupure observée impliquerait que les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie sont produits de manière quasi-identique dans des sites astrophysiques uniformément répartis dans l'Univers, et peuvent même y être accélérés bien au-delà de 10^{20} eV.

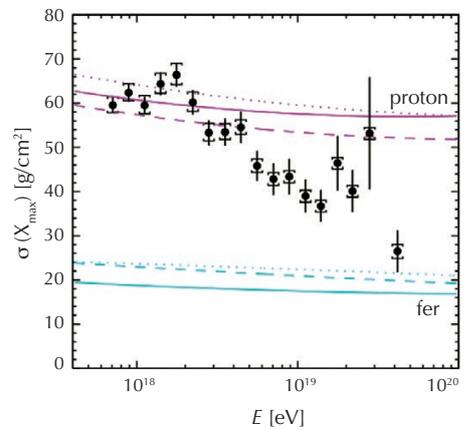
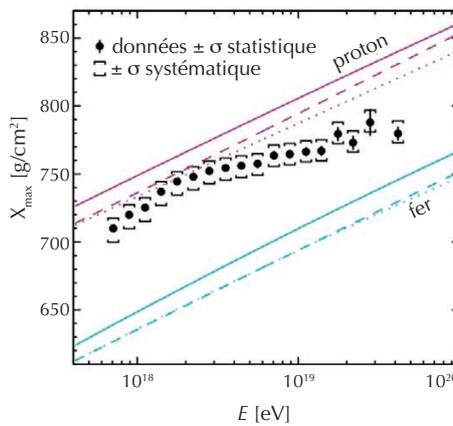
Cependant, les mesures de composition basées sur l'observation du maximum du développement des gerbes, X_{\max} , par les télescopes à fluorescence, ont apporté des éléments qui s'inscrivent mal dans ce scénario standard (fig. 4). En effet, la composition moyenne des rayons cosmiques s'alourdit progressivement avec l'énergie. Afin de reproduire simultanément la moyenne et l'écart type du maximum de développement des gerbes montrés sur la figure 4, des études récentes ont montré que la composante de protons disparaît entre 5×10^{18} et 10^{19} eV, et que la composition est dominée par des noyaux du groupe carbone-azote-oxygène vers 3×10^{19} eV. Ainsi, les modèles visant à reproduire simultanément le spectre en énergie et les mesures de X_{\max} favorisent nettement un scénario dans lequel les rayons cosmiques extragalactiques seraient accélérés proportionnellement à leur charge, avec une énergie de coupure inférieure à 10^{19} eV pour les protons. Dans ce cadre, la coupure du spectre observée à ultra-haute énergie serait principalement la signature de l'énergie maximale d'accélération de noyaux de fer dans les sources, et l'effet GZK serait faible, voire inexistant. Néanmoins, cette explication repose à l'heure actuelle sur une extrapolation des mesures de composition des particules primaires au-delà de $\approx 3 \times 10^{19}$ eV, car le faible flux de rayons cosmiques et le faible cycle de service des télescopes à fluorescence empêchent malheureusement de mesurer X_{\max} aux énergies extrêmes.

Comme déjà évoqué, les déviations magnétiques subies par les rayons cosmiques empêchent l'identification des sources, même à des énergies de 10^{19} eV. Ce n'est donc qu'aux énergies les plus élevées qu'il est éventuellement possible de pointer les sources à quelques degrés. D'autre part, à ces énergies extrêmes, les seules sources visibles ne sont, *a priori*, pas à chercher dans tout l'Univers visible mais dans un volume extrêmement réduit autour de la Voie Lactée, en raison des interactions des rayons cosmiques avec le fond diffus cosmologique, qui réduisent soudainement l'horizon de ces particules au-delà de $\approx 5 \times 10^{19}$ eV (voir l'encadré 3, p. 36). La combinaison de ces deux arguments pourrait en principe offrir la possibilité d'identifier directement les sources des rayons cosmiques extragalactiques. Malheureusement, les recherches de corrélations entre les distributions angulaires des rayons cosmiques et les catalogues



3. Limites supérieures (lignes noires) des amplitudes d'anisotropies dipolaire (en haut) et quadripolaire (en bas) en fonction de l'énergie de la particule primaire, déterminées à l'Observatoire Pierre Auger.

Les limites ont été obtenues à partir des directions d'arrivée de l'ensemble des gerbes détectées dans les intervalles d'énergie indiqués. Les bandes représentent les amplitudes attendues pour des configurations de sources uniformément réparties dans le disque galactique, dans les cas extrêmes de protons (bleu) et de noyaux de fer (violet). À partir de ces limites, une origine galactique pour les protons présents de manière dominante autour de 10^{18} eV est clairement exclue.



4. Moyenne (à gauche) et écart type (à droite) du maximum de développement des gerbes, X_{\max} , en fonction de l'énergie de la particule primaire, mesurés à l'Observatoire Auger.

◆ : données expérimentales. Lignes droites : simulations numériques pour un proton ou un noyau de fer. Ces observations permettent de remonter à la composition des rayons cosmiques par le biais de simulations de gerbes détectées par les télescopes à fluorescence. Un alourdissement progressif des particules primaires avec l'énergie est observé.

En 1966, trois physiciens, l'Américain Kenneth Greisen et les Russes Georgi Zatsepin et Vadim Kuzmin, ont montré que les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ne peuvent se propager sur de très grandes distances. En effet, l'espace intergalactique est en réalité rempli d'un nuage de photons. Ceux-ci constituent le rayonnement fossile émis par l'Univers lorsque, environ 300 000 ans après le Big Bang, le gaz ionisé qui le remplissait est devenu transparent. Aujourd'hui, ce rayonnement est un gaz de photons, dont la température s'est abaissée à quelques trois kelvins à cause de l'expansion de l'Univers. Lorsqu'une particule se déplace avec une énergie supérieure à 5×10^{19} eV, elle « perçoit » ces photons comme des particules de haute énergie capables d'abaisser son énergie significativement lors de chaque collision. On estime qu'un rayon cosmique qui nous arrive avec une énergie supérieure à 10^{20} eV ne peut avoir parcouru une distance supérieure à 150 millions d'années-lumière, quelle qu'ait été son énergie au départ.

De telles distances sont en fait assez modestes à l'échelle cosmologique : elles correspondent à peu près à la taille du groupe de galaxies les plus proches de la nôtre, le « superamas local ». Ainsi, même si des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie sont produits partout dans l'Univers, on ne peut détecter sur Terre que ceux provenant de ce superamas local. On s'attend donc à une réduction drastique du flux au-delà de 5×10^{19} eV. C'est l'effet GZK.



d'objets astrophysiques dans l'Univers proche n'ont mené jusqu'à présent qu'à l'observation de signaux marginalement significatifs. Ceci suggère que l'alourdissement observé jusqu'à $\approx 3 \times 10^{19}$ eV continuerait d'opérer à plus haute énergie, et que la majorité des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie serait composée de noyaux de fer, impliquant des déviations magnétiques encore importantes pour ces particules.

Enfin, l'Observatoire Auger présente également un fort potentiel pour détecter d'éventuels photons ou neutrinos d'ultra-haute énergie. Outre les informations directes sur les directions des sources que ces messagers neutres pourraient apporter, leur détection serait aussi un moyen indirect de tester la nature des rayons cosmiques à plus haute énergie, et notamment la présence de protons. Il faut en effet garder en tête que l'étude des gerbes, et notamment les déductions sur la nature des particules primaires, repose sur des modèles d'interaction hadronique ajustés sur des données prises sur accélérateurs, et obtenues à des énergies inférieures à celles qui se réalisent dans les premiers étages des gerbes d'ultra-haute énergie. Les paramétrages opérés dans les modèles hadroniques reposent donc sur des extrapolations à des énergies jusqu'à trente fois supérieures dans le centre de masse. De grandes incertitudes demeurent donc dans ce domaine, surtout si de la nouvelle physique au-delà du modèle standard de la physique des particules se réalise vers une énergie dans le centre de masse de l'ordre de 10^{14} eV. Cependant,

jusqu'à présent, aucun photon ou neutrino d'ultra-haute énergie n'a été détecté. Les limites obtenues sur les flux de ces particules neutres permettent par ailleurs de contraindre de manière décisive de nombreux scénarios dans lesquels les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie seraient des produits de désintégration de particules ultra-massives, reliques du *Big Bang*.

Le futur : l'upgrade de l'Observatoire

La détermination de la composition des rayons cosmiques aux plus hautes énergies permettrait de développer grandement la compréhension des mécanismes de leur production. S'il s'avérait que l'alourdissement progressif avec l'énergie observé entre 10^{18} et $\approx 3 \times 10^{19}$ eV se confirme à plus haute énergie, la composition des rayons cosmiques d'énergie supérieure à $\approx 5 \times 10^{19}$ eV serait dominée par des noyaux de fer. Du point de vue des mécanismes d'accélération, les conséquences importantes seraient d'une part que les sources épuisent leur capacité à accélérer des particules au-delà de 10^{20} eV (ainsi, la coupure du spectre ne proviendrait pas du mécanisme amenant à la coupure GZK), d'autre part que les rayons cosmiques extragalactiques ne sont pas accélérés selon le célèbre mécanisme de Fermi (voir encadré 2). Les implications d'un tel scénario seraient donc nombreuses, et la détermination de la composition aux plus hautes énergies constitue ainsi la raison première qui a motivé l'upgrade de l'Observatoire à court terme.

Pour relever ce défi, l'upgrade du réseau de surface consistera à compléter les cuves Cherenkov, sensibles aux composantes électromagnétique et muonique des gerbes, par des scintillateurs fixés sur leur dessus, sensibles principalement aux électrons/positrons créés par la composante électromagnétique seulement. En théorie, le profil des gerbes doit être *universel*, qu'elles soient initiées par des protons ou par n'importe quel autre noyau, et peut se voir entièrement décrit à l'aide de quelques paramètres seulement, dont l'énergie E , la profondeur du maximum de développement X_{\max} , et un indicateur du nombre global de muons N_{μ} . Suivant ce principe, la forme des grands signaux détectés au niveau du sol par n'importe quel type de détecteur peut être prédite à partir de quelques paramètres, dont E , X_{\max} et N_{μ} . Mais les corrélations entre ces paramètres empêchent, à l'heure actuelle, leur détermination précise gerbe par gerbe à partir des seules mesures des cuves Cherenkov. En ajoutant une autre mesure suffisamment différente de celle des cuves, comme c'est le cas avec les scintillateurs mesurant le seul signal électromagnétique des électrons/positrons, il sera alors possible de mesurer ces paramètres avec une bonne précision, gerbe par gerbe. La nature des rayons cosmiques pourra être connue avec une grande sensibilité et un cycle de service permanent.

Notons également qu'un sous-réseau de scintillateurs enterrés couvrant une vingtaine de kilomètres carrés, sur un pas resserré par rapport à l'espacement nominal entre deux détecteurs Cherenkov, permettra de mesurer précisément le nombre de muons pour des gerbes d'énergie inférieure à 10^{18} eV. On pourra ainsi confronter le principe de mesure indirecte de N_{μ} avec des scintillateurs sur les cuves à des observations plus directes.

En parallèle à cet *upgrade*, l'Observatoire est également le théâtre de développements pouvant servir de « laboratoire » pour un observatoire du futur, encore plus gigantesque. Les courants induits par la déviation des électrons/positrons créés dans les gerbes par le champ magnétique terrestre, ou l'excès du nombre d'électrons par rapport au nombre de positrons dans les gerbes, sont autant de mécanismes menant à l'émission d'ondes électromagnétiques détectables par des antennes au niveau du sol dans une bande de fréquence entre 30 et 80 mégahertz. Ces mécanismes ont effectivement été mis en évidence expérimentalement, et permettent

aujourd'hui de détecter des gerbes au travers de leur seule radiation électromagnétique. D'autres mécanismes, tels que l'émission par Bremsstrahlung moléculaire des électrons d'ionisation, sont aussi recherchés dans une gamme de fréquence plus élevée (celle du gigahertz). Beaucoup de développements sont encore nécessaires sur ces sujets.

La collaboration Auger a récemment obtenu l'accord de financement pour faire fonctionner l'Observatoire jusqu'en 2023. Les résultats acquis jusqu'à présent étaient pour la plupart inattendus, et nul doute que les futurs résultats réservent encore beaucoup de surprises. Les réponses qu'apporteront les données de l'Observatoire dans sa nouvelle configuration seront décisives pour développer la science des accélérateurs les plus puissants de la Galaxie et d'au-delà. Elles serviront également de marchepied pour dessiner les contours d'un observatoire du futur encore plus grand, capable de percer tous les secrets de ces messagers de l'extrême. ■

En savoir plus

- 1• Site de l'Observatoire Auger : www.auger.org/
- 2• P. Biasi, "Origin of Very High and Ultra-High Energy Cosmic Rays", *C.R. Physique* **15** (2014) 329.
- 3• I. Wingerter-Seez, « La Calorimétrie », *École IN2P3 - Du détecteur à la mesure* (2009), www.in2p3.fr/actions/formation/DetAMesure-09/Calorimétrie.pdf
- 4• A.A. Watson, "Extensive Air Showers and Ultra-High Energy Cosmic Rays", *Lectures given at a summer school in Mexico*, 2002, www.ast.leeds.ac.uk/Auger/augerthesis/mexlects3.pdf
- 5• K.H. Kampert et P. Tinyakov, "Cosmic Rays from the Ankle to the Cutoff", *C.R. Physique* **15** (2014) 318.
- 6• Pierre Auger Collaboration, "Observation of the Suppression of the Flux of Cosmic Rays above $4 \cdot 10^{19}$ eV", *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 061101.
- 7• Pierre Auger Collaboration, "Depth of Maximum of Air-Shower Profiles at the Pierre Auger Observatory: Measurements at Energies above $10^{17.8}$ eV", *Phys. Rev. D* **90** (2014) 122005.
- 8• Pierre Auger Collaboration, "Large Scale Distribution of Arrival Directions of Cosmic Rays Detected above 10^{18} eV at the Pierre Auger Observatory", *The Astrophysical Journal Supplement* **203** (2012) 34.
- 9• Pierre Auger Collaboration, "Searches for Anisotropies in the Arrival Directions of the Highest Energy Cosmic Rays Detected by the Pierre Auger Observatory", à paraître dans *The Astrophysical Journal* (arXiv:1411.6111[astro-ph]).
- 10• O. Deligny, "Cosmic Rays around 10^{18} eV: Implications of Contemporary Measurements on the Origin of the Ankle Feature", *C.R. Physique* **15** (2014) 367.
- 11• D. Harari, "The Flux Suppression at the Highest Energies", *C.R. Physique* **15** (2014) 376.