

L'observatoire Pierre Auger

Corinne Bérat, directeur de recherche au CNRS

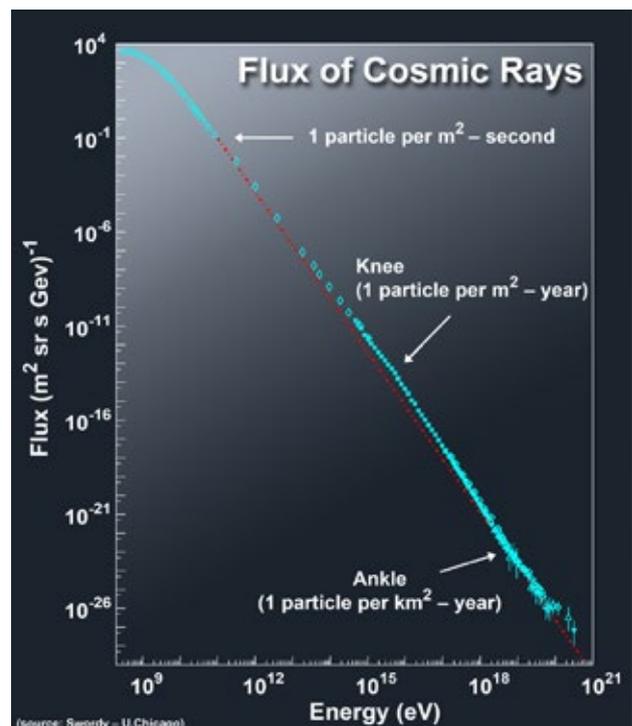
Voilà près d'un siècle que les chercheurs ont compris que la Terre est continûment bombardée par des particules venues du cosmos, les « rayons cosmiques ». Dans le n° 171 des Cahiers Clairaut de septembre 2020, il a aussi bien été question de l'histoire de cette découverte que de ses implications sur la naissance de la physique des particules. Qu'ils viennent du Soleil ou des confins de notre galaxie, les rayons cosmiques sont des précieux messagers de l'Univers. Dès les années 30, le physicien Pierre Auger démontrait que certaines particules de ce rayonnement atteignaient des énergies considérables.

Aujourd'hui l'Observatoire Pierre Auger1, ainsi nommé en l'honneur de ce physicien français ayant étudié, dès 1938, les grandes gerbes atmosphériques, détecte les plus énergétiques d'entre eux, et aussi les plus mystérieux : ce sont les particules les plus énergétiques de l'Univers, leur énergie pouvant dépasser les 10^{20} (des centaines de milliards de milliards) électronvolts (eV). En comparaison, les particules étudiées dans les plus grands accélérateurs, y compris celles accélérées par le grand collisionneur de hadrons au CERN2 à Genève, sont dix millions de fois moins énergétiques. D'où viennent-elles ? Quelle est leur nature ? Comment atteignent-elles des énergies aussi extrêmes ? L'objectif de l'Observatoire Pierre Auger est d'apporter des réponses à ces questions.

Les rayons cosmiques sont des voyageurs du cosmos, et sont donc des particules de durée de vie longue pour arriver ainsi jusqu'à la Terre après un trajet pouvant durer de quelques minutes jusqu'à plusieurs millions d'années. C'est pour cela qu'on trouve dans la composition des rayons cosmiques chargés électriquement des noyaux d'atomes, de l'hydrogène jusqu'au fer, ainsi que des électrons. Étant donné leur énergie, ils ne peuvent être produits que par des phénomènes astrophysiques très violents. À commencer par les réactions de fusion au cœur des étoiles comme le Soleil (le vent solaire à l'origine des aurores polaires est constitué de particules chargées), mais aussi les explosions de supernovae. Il est cependant difficile de savoir par quel objet astrophysique ont été émises les particules cosmiques détectées, car même si on peut connaître leur direction d'arrivée, celle-ci ne pointe pas vers la position du lieu d'émission. En effet, les rayons cosmiques portant une charge électrique sont déviés de leur trajectoire à cause de la force de Lorentz qu'ils subissent lorsqu'ils traversent les régions où règnent des champs magnétiques, comme il en existe dans la Voie lactée. La déviation sera faible si la zone de champ magnétique est peu étendue et d'intensité faible, ou si la particule a une énergie très élevée et une faible charge.

Depuis leur découverte, de nombreuses expériences ont permis de mesurer l'énergie de ces particules cosmiques et leur taux d'arrivée sur la Terre, et pour la plupart, leur nature. Ce qui permet d'établir ce qu'on nomme le spectre des rayons cosmiques, à savoir le

flux en fonction de l'énergie. Les caractéristiques de ce spectre sont remarquables. L'énergie mesurée s'étend sur 12 ordres de grandeur, le flux sur 32 ordres de grandeur. Pour donner une idée, il y a 12 ordres de grandeur entre l'épaisseur d'un cheveu et une distance de 100 000 km, 32 ordres de grandeur entre la taille d'un cheveu et 1 000 milliards d'années lumière !!! La décroissance du spectre indique que plus les rayons cosmiques sont énergétiques, plus leur flux est faible avec une pente telle que si on détecte des rayons cosmiques avec une énergie dix





*Fig.1. Une vue d'artiste d'une gerbe atmosphérique se développant au-dessus d'un détecteur de particules de l'Observatoire Pierre Auger, sur fond de ciel étoilé.
© A. Chantelauze, S. Staffi, L. Bret.*

fois plus élevée, leur flux (exprimé en particule/m²/sr/s/GeV) sera environ mille fois plus faible. Ainsi, le flux de rayons cosmiques d'énergie autour de 100 GeV est de l'ordre de 1 particule/m²/s, alors que ceux d'énergie autour de 10¹⁵ sont de 1/m²/an.

Il n'est pas si simple de se rendre compte de l'incroyable quantité d'énergie que 10²⁰ eV présente pour une particule subatomique. 10²⁰ eV correspond à 16 joules : une énergie macroscopique se retrouve concentrée sur un unique noyau atomique. Pour accélérer des protons à ces énergies avec un accélérateur de particules de technologie similaire à celui du LHC au CERN¹, il faudrait une circonférence de la taille de l'orbite de Mercure ! Si dans un gramme d'hydrogène, tous les protons ont une énergie de 10¹⁹ eV alors cela équivaut à des centaines de milliers d'années d'alimentation de la France en énergie (car dans ce gramme d'hydrogène, le nombre de protons de 1,6 J est d'environ 6,02 10²³, nombre d'Avogadro). Mais de telles particules sont excessivement rares, moins de 1 par km² et par siècle, ce qui revient à beaucoup moins de 1 kWh (environ 25 Wh) par an sur la superficie de la France...

De fait, l'étude des rayons cosmiques d'ultra haute énergie est difficile car il faut faire face à des défis expérimentaux. Alors qu'on peut détecter des rayons cosmiques par des méthodes directes en utilisant des détecteurs envoyés par satellite, par ballons, ou placé sur la Station spatiale internationale (comme AMS, voir les Cahiers Clairaut n° 171), au-delà de la centaine de TeV, il devient matériellement impossible de procéder ainsi, car envoyer dans l'espace des détecteurs de plusieurs kilomètres carrés n'est pas envisageable. Étant donné leur flux extrêmement

faible, il est nécessaire de couvrir des surfaces de détection gigantesques pour collecter un grand nombre d'événements. Il faut utiliser des méthodes de détection indirecte : ces particules cosmiques sont observées en caractérisant les cascades de milliards de particules secondaires qu'elles génèrent dans l'atmosphère sous forme de grandes gerbes atmosphériques.

Une gerbe atmosphérique est une cascade de particules produite lorsqu'un rayon cosmique pénètre dans l'atmosphère (figure 1). Pour un rayon cosmique tel qu'un proton, un noyau d'atome, la première interaction se produit dans la haute atmosphère, à une vingtaine de kilomètres d'altitude. Cette première interaction produit un grand nombre de particules secondaires, qui engendrent elles-mêmes d'autres interactions : c'est toute une cascade qui est donc générée dans les premières couches de l'atmosphère ; certaines de ces particules se désintègrent, donnant naissance à des particules qui vont elles aussi interagir, tant que leur énergie est suffisante.

Plus l'énergie du rayon cosmique est élevée, plus cet effet de réaction en chaîne sera important, et plus il y aura de particules qui pourront atteindre le sol sans être absorbées dans l'atmosphère. Les muons qui sont produits dans ces gerbes avec une énergie de quelques GeV peuvent se propager jusqu'au sol en grand nombre.

Les muons sont les particules chargées les plus abondantes au niveau de la mer, en moyenne le taux est de 1 muon/cm²/min. Ce flux de muons est utilisé par les dispositifs de détection tels que le Cosmo-détecteur pour des études expérimentales dans les lycées (voir les Cahiers Clairaut n° 171).

¹ CERN : Laboratoire européen pour la physique des particules.

Les rayons cosmiques d'ultra haute énergie produisent une cascade de plusieurs milliards de particules, arrosant des surfaces de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Et ce n'est qu'à travers cette cascade de particules secondaires qui bombardent le sol que l'on peut espérer découvrir la nature et la provenance du rayon cosmique qui l'a déclenchée, ainsi que la source de son énergie extrême.

L'Observatoire Pierre Auger

L'acte de naissance de cet observatoire a été signé en 1999 en Argentine, dans la ville de Mendoza, concrétisant huit années de gestation et de montage du projet. Quelques physiciens, emmenés par James Watson Cronin (prix Nobel de physique en 1980) de l'université de Chicago et Alan Watson de l'université de Leeds, se sont mis en tête de concevoir un observatoire gigantesque pour étudier les rayons cosmiques d'ultra haute énergie. L'idée des chercheurs est de disperser sur un vaste territoire un réseau de plus d'un millier de détecteurs régulièrement espacés pour former un capteur géant en mesure de collecter des informations précises sur ces rayons cosmiques.

L'Observatoire Pierre Auger couvre une superficie de 3 000 km² dans la Pampa Amarilla, en Argentine, par 35° de latitude sud et 65° de longitude ouest, au pied de la cordillère des Andes, à proximité de la ville de Malargüe. Le lieu a été choisi pour son étendue, sa très faible densité de population et son atmosphère claire ; de plus l'altitude d'environ 1 400 m permet de détecter les gerbes avant leur extinction. La construction de l'observatoire a débuté en 2000. L'installation complète des détecteurs s'achève en 2008, donnant naissance au plus grand observatoire jamais mis en place dans le monde, et treize ans après, il le reste toujours. Outre sa taille exceptionnelle, l'observatoire allie deux techniques complémentaires de détection des grandes gerbes atmosphériques :



Fig.2a. Un détecteur de particules à effet Cherenkov (cuve à eau de 3,6 m de diamètre).

© CNRS Photothèque / Céline ANAYA-GAUTIER.

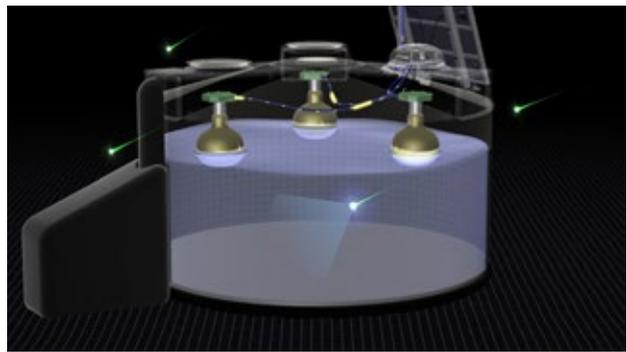


Fig.2b. Schéma d'un détecteur de particules.

- 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 à une certaine distance du cœur de la gerbe ;
- des télescopes à fluorescence entourant le réseau, pour mesurer leur profil longitudinal, c'est-à-dire le nombre de particules en fonction de l'altitude.

Le réseau au sol comprend 1 660 détecteurs de particules, espacés tous les 1,5 kilomètre (sauf dans une zone plus dense) répartis suivant un maillage triangulaire. Chaque détecteur (figure 2) est une cuve remplie de 12 tonnes d'eau pure, utilisant l'effet Cherenkov : en pénétrant dans l'eau, les particules chargées ultrarelativistes composant les gerbes atmosphériques, telles que les électrons, positrons et muons, rayonnent par effet Cherenkov ;

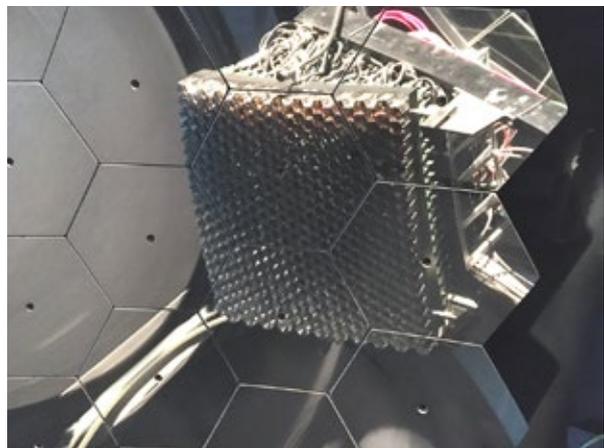


Fig.3. Télescope de fluorescence : caméra de 440 pixels constitués de photomultiplicateurs se reflétant dans le miroir (surface de 13 m²) ©Corinne Bérat.

les nombreux photons de haute énergie présents dans la gerbe produisent des paires électron-positron dans l'eau et sont ainsi détectés de manière indirecte. Le rayonnement émis est capté par trois photomultiplicateurs placés à la surface de l'eau.

Chaque cuve est autonome, alimentée par un système de panneaux solaires et batteries, et envoie les informations collectées par radio. Le réseau de surface opère avec un cycle de service quasi permanent.

L'autre technique de détection des gerbes repose sur des télescopes, ayant dans le plan focal une caméra constituée de photomultiplicateurs (figure 3) qui surveillent chacun une petite zone du ciel.

Ces capteurs détectent la lumière ultra-violette de fluorescence émise 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 composante électromagnétique des gerbes. Bien que très faible (équivalent à une lampe de quelques dizaines de watts), l'émission lumineuse peut être détectée jusqu'à 30 ou 40 kilomètres de distance pendant des nuits sans Lune. Au total, 27 télescopes sont répartis sur cinq sites, et sont orientés de manière à scruter l'atmosphère au-dessus du 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 (figure 4).

Aujourd'hui l'Observatoire Pierre Auger est exploité par la collaboration éponyme, rassemblant plus de 400 hommes et femmes (chercheur, ingénieur et technicien) de 17 pays qui participent à cette aventure. 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

L'utilisation conjointe de ces deux ensembles de détection a permis à l'observatoire Pierre Auger de franchir un saut autant qualitatif que quantitatif qui le place à la pointe des recherches dans ce domaine d'étude.

Après une quinzaine d'années de fonctionnement, les analyses bénéficient d'une statistique importante et d'une compréhension de plus en plus précise des mesures réalisées. Cela permet d'obtenir, aujourd'hui, des résultats remarquables et des avancées scientifiques dans la connaissance de ces particules cosmiques et dans la compréhension des phénomènes de haute énergie liés aux processus les plus violents de l'Univers.

La mesure du spectre des rayons cosmiques réalisée par l'observatoire Pierre Auger couvre une grande gamme d'énergie, allant de $3 \cdot 10^{16}$ à plus de 10^{20} eV. Pour les autres gammes d'énergie sont utilisés ballons, satellites, ISS. Plusieurs particularités ont été mises en évidence comme par exemple la suppression chute brutale du flux (on parle de « suppression » du flux) pour une énergie supérieure à $5 \cdot 10^{19}$ eV. Vers 10^{18} eV l'observatoire a détecté des centaines de milliers de rayons cosmiques, alors qu'il n'en a mesuré qu'une quinzaine au-delà de 10^{20} eV. Cette suppression du flux a été prédite théoriquement en 1966, un an après la découverte du fond diffus cosmologique, empreinte du premier rayonnement émis par l'Univers 380 000 ans après le Big Bang.



Fig.4. Au second plan l'un des bâtiments qui abritent six télescopes de fluorescence, surplombant au premier plan, un détecteur de particules.

L'Américain K. Greisen ainsi que les Russes G. Zatsepin et V. Kuz'min, remarquent que les rayons cosmiques d'ultra haute énergie doivent forcément interagir avec les photons de ce fond diffus, un processus connu aujourd'hui sous le nom d'effet « GZK ».

Or une telle interaction réduit considérablement leur énergie et une particule qui atteint la Terre avec une énergie supérieure à $60 \cdot 10^{18}$ eV ne peut provenir que d'une zone de l'Univers relativement « proche », c'est-à-dire située à moins de 300 millions d'années-lumière. Il est alors possible d'interpréter la forte diminution du flux mesurée par la manifestation de l'effet GZK.

Mais il est aussi possible d'attribuer cette réduction du flux à une limite naturelle des sites astrophysiques qui accélèrent les rayons cosmiques. C'est en effet ce type de scénario dans lequel les particules sont accélérées dans l'Univers par des objets astrophysiques puissants qui est retenu pour expliquer l'origine des RCUHE (rayons cosmiques d'ultra hautes énergies). Les limites sur les flux de photons et de neutrinos d'ultra haute énergie mesurée grâce aux données de l'observatoire ont permis d'éliminer la plupart des modèles dans lesquels les rayons les plus énergétiques seraient les produits de décroissance de particules (hypothétiques) très massives.

Le spectre présente également des petites inflexions à deux autres énergies : à $5 \cdot 10^{18}$ eV inflexion déjà connue, mais aussi, pour la première fois, vers $1,3 \cdot 10^{19}$ eV.

Autant d'irrégularités qu'il faut expliquer en les reliant à des phénomènes astrophysiques ou cosmologiques.

La mesure du spectre seul ne permet pas d'en interpréter les caractéristiques observées. Il faut également connaître la nature des particules qui composent le flux mesuré. C'est le développement de la gerbe, en particulier la position de son maximum, mesuré grâce au télescope de fluorescence, qui est un indicateur de la masse de la particule à l'origine de la gerbe. Les mesures effectuées indiquent que la composition du flux s'alourdit avec l'énergie, ce qui était assez inattendu dans les scénarios envisagés avant les résultats de l'observatoire. Les études de la composition du flux ne privilégient pas une composition exclusive de protons autour et au-delà de $5 \cdot 10^{18}$ eV.

D'autres éléments plus lourds, de l'hélium jusqu'au fer, compose le flux de ces rayons cosmiques. Les résultats sont plus en accord avec un scénario où plusieurs composantes nucléaires sont présentes et dans lequel les noyaux sont accélérés jusqu'à des énergies maximales en proportion de leurs charges

électriques par les champs électromagnétiques imprégnant les environnements des sources.

Comme déjà évoqué, les champs magnétiques présents dans la Galaxie, de l'ordre du micro-gauss, courbent tellement la trajectoire des particules qu'ils empêchent l'identification directe des sources des rayons cosmiques par leur direction d'arrivée. Néanmoins, pour des énergies supérieures à 10^{18} eV, la rigidité des trajectoires des particules devient suffisamment grande pour que certaines irrégularités puissent apparaître dans les directions d'arrivée étudiées à grande échelle. L'étude de la répartition des directions d'arrivée des rayons cosmiques a ainsi fourni la preuve que les plus énergétiques viennent d'au-delà de notre galaxie. Une corrélation a même été établie entre la direction d'arrivée de rayons cosmiques d'énergie supérieure à $4 \cdot 10^{19}$ eV et la position de galaxies à flambée d'étoiles. Ces résultats constituent une avancée majeure puisque pour la première fois les rayons cosmiques d'ultra haute énergie se trouvent reliés à des phénomènes astrophysiques extragalactiques. Même si leurs sources n'ont jusqu'alors pas été identifiées de façon formelle, les nombreux résultats récents sont porteurs d'espoir quant à la possibilité de mieux comprendre leur origine.

La collaboration Pierre Auger a entrepris d'améliorer les performances de l'observatoire, pour percer le mystère de la nature et de l'origine de ces particules cosmiques, avec le projet AugerPrime, qui permettra d'apporter les éléments de réponses indispensables pour élucider cette question. L'élément clé est l'ajout de détecteurs à scintillation sur chaque cuve à eau. Pour traiter les informations délivrées par ces deux types de détecteurs, une nouvelle électronique d'acquisition et de contrôle est développée par la collaboration Pierre Auger et les laboratoires impliqués. Les nouveaux détecteurs sont en cours d'installation sur le site de l'observatoire, plusieurs sont déjà en fonctionnement. AugerPrime comprend également des détecteurs de muons enterrés dans une zone de 17 km^2 , et l'ajout d'antennes radio, pour détecter les radiations émises par les gerbes atmosphériques dans la gamme du MHz.

Avec ce programme AugerPrime, il sera bientôt possible de distinguer les composantes électromagnétique et muonique des gerbes atmosphériques. Une amélioration qui va faire gagner les mesures en sensibilité et permettre de collecter plus d'informations sur la composition en masse des rayons cosmiques aux énergies les plus élevées. Une donnée cruciale pour trancher entre les différents scénarios sur l'origine de ces particules cosmiques d'énergie incroyablement élevée.

<http://www.auger.org/>

■