

# Les rayons cosmiques, messagers de l'Univers

Denis Gialis

Docteur en Astrophysique - Université J. Fourier - Grenoble

**D**écouverts il y a un siècle, les **rayons cosmiques** gardent encore, de nos jours, de nombreux mystères. Précisons, tout d'abord, que le terme «rayons» ne convient absolument pas puisqu'il s'agit principalement de particules de matière tout à fait ordinaires, à savoir, des noyaux atomiques ( $H^+$ ,  $He^{2+}$ , ...). Ces **astroparticules** voyagent à travers l'Univers et emportent avec elles une énergie<sup>1</sup> qui peut dépasser les  $10^{20}$  eV, c'est-à-dire l'énergie d'une balle de tennis lancée à 100 km/h environ, mais concentrée dans une particule de taille microscopique !

**Comment les rayons cosmiques ont-ils été découverts ? Que sait-on aujourd'hui de ces astroparticules ? Et surtout, quel rôle important jouent-elles dans l'astrophysique moderne ?**

Historiquement, la première manifestation d'un phénomène physique lié à l'existence des rayons cosmiques a été observée par le français Charles de Coulomb au XVIII<sup>ème</sup> siècle. Ce dernier constata, de manière fortuite, qu'une sphère chargée électriquement et pendue au bout d'un fil isolant voyait sa charge décroître au court du temps. Malheureusement, il ne pût interpréter ce phénomène qui, nous le savons aujourd'hui, est en partie le résultat de l'interaction entre les rayons cosmiques qui arrivent sur Terre et les particules chargées présentes sur la sphère chargée. Plusieurs physiciens (Wilson, Elster, Wulf...) ont tenté d'expliquer ce phénomène dans les années 1900 mais sans grand succès. Ce n'est qu'en 1912, que le physicien autrichien Victor Hess, suite à des expériences faites à bord de ballons atmosphériques, prouva qu'un rayonnement ionisant provenait de l'espace. Ce rayonnement fût alors appelé **rayons cosmiques** par Robert Milikan, mais il fallut attendre 1929 et les travaux de Bothe et

Kohlörster pour définitivement montrer que ces rayons cosmiques n'étaient rien d'autre que des particules chargées comme, par exemple, des noyaux atomiques ou des électrons.

**Que se passe-t-il vraiment lorsqu'un rayon cosmique arrive au niveau de la haute atmosphère ?**

Ce n'est qu'à partir des années trente que diverses expériences ont permis de décrire correctement le phénomène. On comprit alors peu à peu que la rencontre entre un rayon cosmique et les molécules situées dans les couches supérieures de l'atmosphère est quelque chose d'assez brutal ! En effet, la collision qui se produit crée ce que l'on appelle une **gerbe de particules** dites **secondaires** qui, à leur tour, vont subir maintes collisions et produire encore plus de particules... Le nombre de particules va augmenter, ainsi que la taille de la gerbe et ce, jusqu'à une certaine altitude où les particules, ayant de moins en moins d'énergie, vont commencer à être absorbées par l'atmosphère. En mesurant l'altitude où la taille de la gerbe est maximale, on montre qu'il est possible de retrouver l'énergie et la nature du rayon cosmique à l'origine de la gerbe.

Cette altitude peut être estimée soit grâce à des instruments embarqués sur des ballons atmosphériques ou des satellites, soit en observant les particules secondaires qui réussissent à atteindre le sol : aussi, c'est à l'équipe du français Pierre Auger que l'on doit les premières mesures au sol à la fin des années trente. Ils conclurent que l'énergie des rayons cosmiques pouvait être supérieure à  $10^{15}$  eV. Les gerbes de particules furent alors appelées **gerbes d'Auger**. Depuis 1962, plusieurs dizaines de rayons cosmiques, dont l'énergie est supérieure à  $10^{20}$  eV, auraient été détectés et de nombreuses expériences ont été réalisées comme celles, par exemple, de l'Observatoire Auger<sup>2</sup> ou celle d'HiRes<sup>3</sup> (qui ont lieu actuellement).

---

<sup>1</sup> L'unité d'énergie utilisée est l'électron-volt (eV) qui vaut à peu près  $1.6 \times 10^{-19}$  J.

---

<sup>2</sup> <http://www.auger.org/>

## Quelle est l'origine des rayons cosmiques ?

L'observation des rayons cosmiques a permis de révéler que leur origine est différente suivant les gammes d'énergie : par exemple, les rayons cosmiques dont l'énergie est inférieure à quelques  $10^9$  eV proviennent essentiellement du vent solaire et leur composition est donc similaire à la composition chimique du Soleil. Entre  $10^9$  eV et  $10^{15}$  eV, les rayons cosmiques proviendraient plutôt de sources situées à l'intérieur notre Galaxie. Ils seraient accélérés via les chocs produits par les éjectas de supernovae. Au-delà de  $10^{15}$  eV, deux problèmes se superposent : tout d'abord, le nombre de rayons cosmiques est trop faible pour permettre des observations directes depuis des ballons ou des satellites et l'on ne dispose que de techniques moins précises d'observation indirecte qui se font au niveau du sol. Il est alors plus difficile d'établir précisément leur composition chimique. Ensuite, leur énergie est telle qu'il ne semble pas exister d'objet astrophysique dans notre Galaxie capable de les produire en nombre suffisant pour expliquer le flux que l'on observe. Leur origine est donc nécessairement **extragalactique**: les recherches théoriques ont montré, au cours de la dernière décennie, que ces derniers proviennent sans doute de vents relativistes<sup>4</sup> issus de noyaux actifs de galaxie, de pulsars ou bien de sursauts gamma...

Le problème de la production des rayons cosmiques devient plus compliqué au-delà de  $10^{19}$  eV. C'est à cette énergie que l'on commence à parler de **rayons cosmiques ultra-énergétiques** (ou RCUE). D'un point de vue observationnel tout d'abord, leur nombre, au niveau de la Terre, ne dépasse pas 1 particule par  $\text{km}^2$  et par an, ce qui rend leur détection très difficile ! C'est pour cette raison que les nouveaux détecteurs au sol ont des surfaces collectrices de plusieurs milliers de  $\text{km}^2$ , prêtes à intercepter les particules secondaires produites par ces astroparticules ultra-énergétiques lors de leur rentrée dans l'atmosphère. Ensuite, leur énergie est telle que les processus d'accélération à l'origine de leur production sont peu nombreux dans l'Univers que l'on observe. Les meilleurs candidats actuels, où peuvent se dérouler de tels processus, sont encore les noyaux actifs

de galaxie et les sursauts gamma, mais différents scénarii sont possibles quant aux conditions d'accélération pouvant donner naissance à des RCUE. Par ailleurs, ces objets astrophysiques sont également étudiés en tant que sources d'intenses rayonnements gamma et de neutrinos de haute énergie, qui peuvent être considérés comme des signes de la présence de RCUE. Enfin, le problème de leur production est intimement lié à celui de leur propagation ou transport dans l'espace : non seulement les rayons cosmiques ne se propagent pas en ligne droite et sont sans cesse déviés par les différentes structures magnétiques présentes dans l'Univers, mais les RCUE, contrairement aux rayons cosmiques de plus basse énergie, ne peuvent se propager sur de longues distances sans perdre une partie importante de leur énergie. En 1966, Greisen, Zatsepin et Kuzmin ont montré qu'au-delà de quelques  $10^{19}$  eV, les rayons cosmiques interagissent avec les photons du fond diffus cosmologique<sup>5</sup>. C'est ce que l'on appelle l'**effet GZK**. A chaque interaction, les RCUE perdent de l'énergie en produisant des particules telles que les pions. Ainsi, on démontre que les RCUE dont l'énergie observée est de l'ordre de  $10^{20}$  eV ne peuvent provenir que de sources situées à l'intérieur d'une sphère (centrée sur la Terre) d'environ 100 Mpc de rayon<sup>6</sup>. Autrement dit, les RCUE qui viennent de plus loin ont subi une perte d'énergie trop importante et ne sont donc plus dans la catégorie des RCUE en arrivant au niveau de la Terre. Bien que le rayon de cette sphère, dite GZK, puisse paraître gigantesque, il reste néanmoins très inférieur à la taille de l'Univers observable qui est supérieure à plusieurs milliers de Mpc, ce qui réduit les possibilités quant aux différentes origines.

Le nombre de sources extragalactiques capables de produire des RCUE dans la sphère GZK peut apparaître bien faible: c'est la raison pour laquelle la question de savoir quels objets sont capables de jouer le rôle d'accélérateurs de particules assez puissants pour créer suffisamment de RCUE, est encore largement débattue. Les sources, comme les sursauts gamma ou les noyaux actifs de galaxies, pourraient être assez nombreuses, mais de nouvelles observations semblent

---

<sup>3</sup> <http://www.cosmic-ray.org/>

<sup>4</sup> c'est-à-dire dont la vitesse est proche de celle de la lumière.

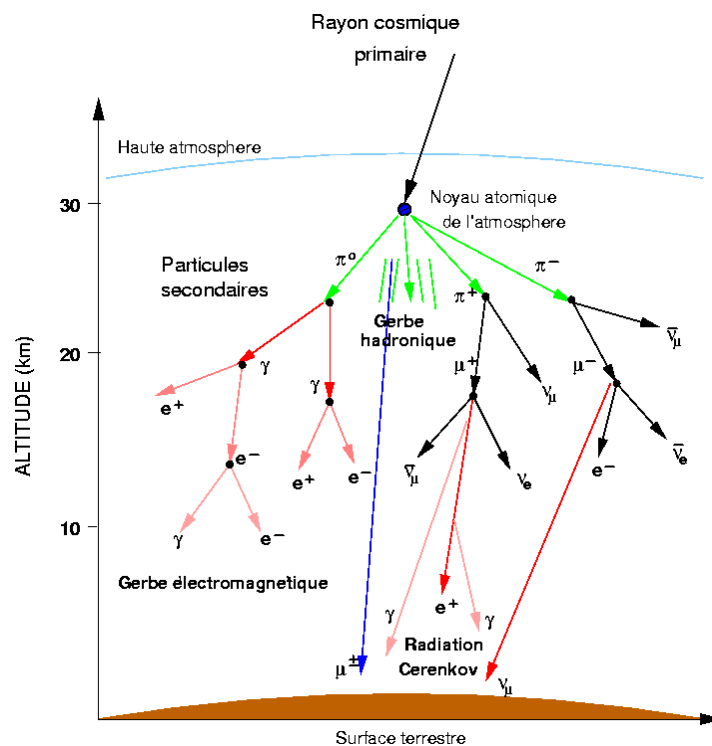
<sup>5</sup> Il s'agit du fameux rayonnement à 2.7 K produit environ 400 000 ans après le Big Bang et qui est présent dans tout l'Univers.

<sup>6</sup> 1 Mpc =  $10^6$  parsecs et 1 parsec = 3.26 années lumière...

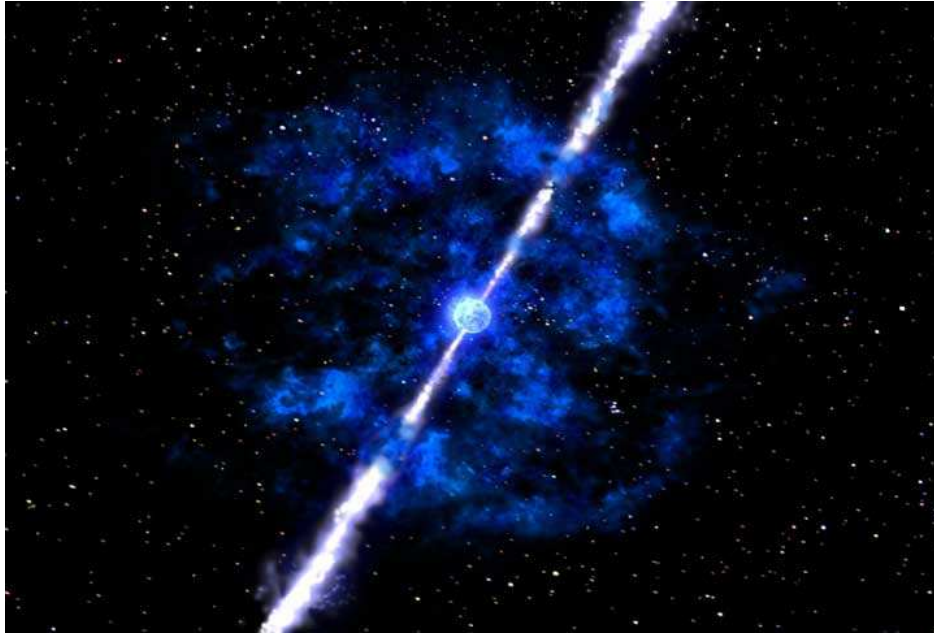
incontournables. Enfin, il faut souligner que d'autres hypothèses sont également avancées et font intervenir des phénomènes physiques beaucoup plus exotiques et très complexes. On peut citer, à titre d'exemples, la désintégration de particules super-massives prédites par la Théorie de Grande Unification ou bien, l'annihilation de défauts topologiques de l'espace-temps qui produiraient des RCUE. C'est donc dans un contexte à la fois de physique des particules, de physique des hautes énergies et de cosmologie que s'inscrit l'étude des rayons cosmiques ultra-énergétiques.

Ainsi, les rayons cosmiques apparaissent, au même titre que les photons ou les neutrinos,

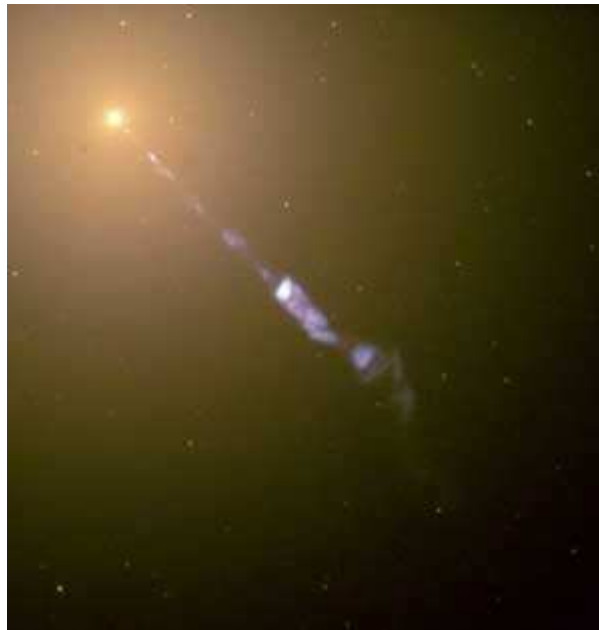
comme des messagers essentiels permettant de sonder l'Univers lointain. Parmi eux, les rayons cosmiques ultra-énergétiques soulèvent de nombreuses questions quant à leur origine, leur nature ou leur transport, qui nécessitent de connaître à la fois la structure globale de l'Univers (répartition de la matière et du champ magnétique) mais également les propriétés physiques des objets qui s'y trouvent. Leur étude est donc à l'intersection de nombreux domaines de la physique et de l'astrophysique théorique moderne. Depuis la théorie du Big Bang jusqu'à la Théorie de Grande Unification, les RCUE apporteront, sans aucun doute, des réponses décisives aux grandes questions de la physique du XXI<sup>ème</sup> siècle.



**Fig. 1 :** Illustration d'une gerbe de particules produite par un rayon cosmique pénétrant dans l'atmosphère. La gerbe atteint sa taille maximale vers 15 km d'altitude puis se rétrécit ensuite. (Dessin : Denis Gialis)



**Fig. 2 :** *Illustration du double jet se produisant lors d'un sursaut gamma: l'accélération des rayons cosmiques a lieu tout au long des jets, depuis l'objet central, résidu d'une hypernova ou collapse d'objets compacts, jusqu'en bout de jet où se forme un choc ultra-relativiste avec le milieu interstellaire ambiant. (Credit: NASA/Zhang & Woosley)*



**Fig. 3 :** *Photo du jet d'électrons et de particules issu du noyau actif de la galaxie M87. (Credit: NASA/Hubble Heritage)*

**Pour aller plus loin :**

***The Astrophysics of Ultra-High Energy Cosmic Rays***, K. Kotera & A.V. Olinto, 2011.  
***The Highest-Energy Cosmic Rays***, J.W. Cronin, TAUP 2003, Seattle, USA.  
***Cosmic Physics: the High Energy Frontier***, F.W. Stecker, 2003.