

## La détection des rayons cosmiques

Peter von Ballmoos, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Toulouse

*L'article décrit différentes méthodes scientifiques pour détecter ces rayons totalement invisibles mais qui possèdent une énergie colossale : « autant que dans toute la lumière des étoiles ».*

La Terre est constamment bombardée par des particules à haute énergie. Chaque centimètre carré de notre atmosphère est criblé, chaque seconde, par un ou plusieurs rayons cosmiques. Intégré sur la surface de la planète, ce déluge de particules peut paraître impressionnant. Toutefois, la masse cumulée des particules du rayonnement cosmique interceptées par la Terre au cours d'une année correspond à 500 grammes seulement – ridiculement peu comparé aux 30 000 tonnes de matériel météoritique accrété chaque année. Les rayons cosmiques sont néanmoins des messagers astrophysiques de toute première importance. Ils constituent l'un des rares échantillons de matière provenant de l'extérieur de notre Système solaire, véhiculant des énergies cinétiques vertigineuses. Le fait qu'il y ait autant d'énergie dans les rayons cosmiques que dans toute la lumière des étoiles parle de lui-même ; le flux énergétique des rayons cosmiques intercepté par la Terre (environ  $10^9$  W) est presque un ordre de magnitude plus important que le flux énergétique des météorites<sup>1</sup>.

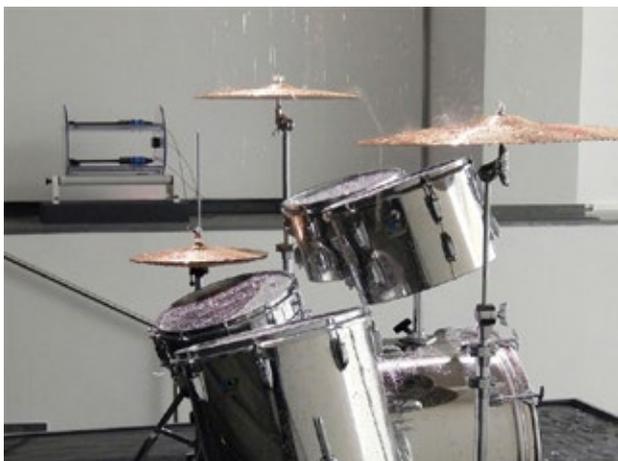
Les rayons cosmiques primaires (ceux qui bombardent l'atmosphère terrestre depuis l'espace), sont composés de protons (89 %), de noyaux d'hélium (9 %) et de noyaux plus lourds (1 %), jusqu'à l'uranium ; la fraction des électrons n'est que de 1 % de celle des noyaux. Une très petite fraction est constituée de particules d'antimatière, telles que les positrons ou les antiprotons. L'interaction de ces rayons cosmiques primaires avec les atomes des hautes couches de l'atmosphère crée des gerbes cosmiques contenant des myriades de particules secondaires. Une partie de ces particules traversent notre atmosphère et arrivent jusqu'au niveau du sol dans une pluie continue (voir en particulier l'article de M. Renaud dans ce numéro). Des dizaines de particules secondaires (essentiellement des muons) passent ainsi au travers de notre corps chaque seconde sans que nous nous en apercevions.

Mais alors, comment se rendre compte de ce phénomène omniprésent ? N'y a-t-il réellement aucun moyen d'observer des rayons cosmiques avec nos yeux ? Pour nous, Terriens, voir directement des rayons cosmiques est effectivement impossible... Heureusement ! Par contre, en dehors de la magnétosphère de notre planète, certains astronautes (par exemple lors du programme lunaire Apollo) ont raconté avoir perçu des « flashes lumineux », et ce, même les yeux fermés ! Il s'agit vraisemblablement de particules de rayons cosmiques qui ont traversé leur œil, produisant des flashes de lumière visible à travers « l'effet Cherenkov » – nous décrirons ce phénomène plus bas, dans le paragraphe sur les instruments d'observation des rayons cosmiques. Mise à part cette expérience extrêmement rare, le phénomène des aurores boréales, magnifiques lumières célestes observables à certains endroits de la Terre, illustre bien l'effet produit par l'interaction des rayons cosmiques avec la matière. Les aurores boréales sont produites lorsque les particules chargées du vent solaire (moins énergétiques mais beaucoup plus abondantes que les rayons cosmiques) arrivent à atteindre l'atmosphère en suivant les lignes du champ magnétique de la Terre qui les canalisent vers les régions polaires. Les particules heurtent alors les composants de la haute atmosphère – on dit que les particules du vent solaire ionisent ou excitent les atomes et molécules. Quand ces atomes et molécules retrouvent leur état d'origine (les physiciens disent qu'ils se recombinent et se désexcitent), ils émettent de la lumière aux teintes vertes, violettes ou roses. L'atmosphère agit ici comme un énorme scintillateur – un type de détecteur très répandu dont on parlera également ci-dessous – tandis que nos yeux jouent le rôle de photodétecteurs.

Dans un autre registre, afin de prendre conscience de la présence imperceptible des rayons cosmiques, l'artiste Céleste Boursier-Mougenot a imaginé et conçu une installation appelée *Averses*, qui a été exposée au musée d'art contemporain des Abattoirs de Toulouse en 2014 (figure 1). *Averses* est une

<sup>1</sup> 30 000 tonnes de météorites par an donnent, avec l'hypothèse de  $V_{\text{impact}} \approx 20$  km/s, une puissance de  $P_{\text{météorites}} \approx 2 \times 10^8$  W.

batterie de musique « frappée par les rayons cosmiques » : l'installation est composée d'un détecteur qui, au passage d'une gerbe cosmique, déclenche une pluie brève et intense qui survient depuis le toit du musée. Quelque vingt-cinq mètres en dessous, cette averse fait sonner peaux et cymbales de la batterie... réveillant la curiosité du visiteur qui déambule dans l'exposition sans savoir qu'à tout moment, son corps est lui-même potentiellement traversé par des particules extra-terrestres.



**Fig.1.** Exposée au Musée des Abattoirs de Toulouse en 2014, l'installation artistique «Averses» de Céleste Boursier-Mougenot matérialise la présence invisible des rayons cosmiques. Lorsque le télescope à muons (en arrière-plan à gauche de la batterie) détecte le passage d'une gerbe cosmique, une électrovanne d'une arrivée d'eau est actionnée. Située au plafond à environ 25 m au-dessus de l'instrument, celle-ci libère une courte mais intense averse d'eau. Les gouttes de cette douche font sonner les tambours et les cymbales, à des intervalles d'environ deux minutes en moyenne.

## Par quels moyens d'observation les rayons cosmiques sont-ils étudiés aujourd'hui ?

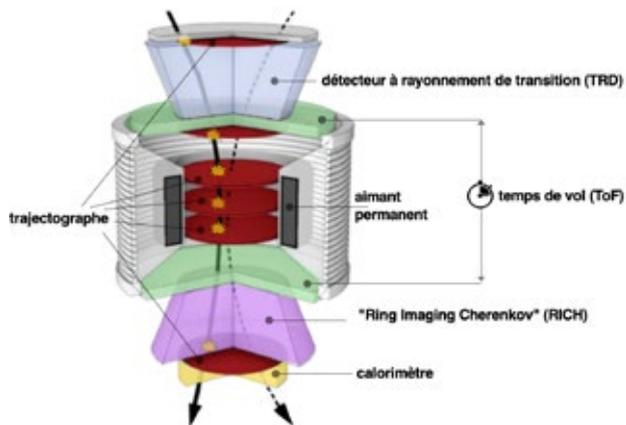
Bien que les systèmes de détecteurs varient considérablement en taille et en complexité, le nombre de processus physiques sur lesquels repose la plupart des détecteurs est limité. Dans le paragraphe sur la perception humaine des rayons cosmiques, nous avons déjà fait la connaissance de plusieurs effets couramment utilisés : « l'effet Cherenkov », la courbure des trajectoires et l'ionisation d'un milieu. Ici on mesure l'ouverture angulaire du cône Cherenkov, la déviation de la trajectoire et la perte d'énergie dans le milieu. Les observables recherchées sont avant tout l'identification de la particule (proton, antiproton, électron, positron, noyau d'hélium, noyau d'élément lourd comme par exemple le fer) – elle passe par la mesure de la masse et de la charge de la particule ; l'énergie cinétique

qui est souvent très élevée (1 GeV à 100 EeV<sup>2</sup>) vu que la vitesse des particules est proche de celle de la lumière. Pour identifier une particule, on a en général besoin de deux ou plusieurs mesures, avec chacune dépendant différemment de la masse, de la charge, et de la vitesse. La direction d'arrivée de la particule n'est généralement pas significative pour sa provenance cosmique – les champs magnétiques (de la Terre, du Soleil, de la Voie lactée et s'il faut du milieu intergalactique) ayant brouillé les pistes en enroulant les trajectoires tels que les spaghettis dans un plat. Enfin, une observable clef est le flux, c'est-à-dire le nombre de particules traversant une unité de surface par unité d'angle solide et par unité de temps.

Ci-dessous, les principales techniques de détection les grandeurs mesurées sont évoquées pour un observatoire spatial de type AMS-02. Le schéma de principe d'un tel instrument est esquissé dans la figure 2.

En opération à bord de la Station spatiale internationale depuis 2011, AMS-02 a une masse de 7,5 tonnes, ses dimensions sont de 5 m × 4 m × 3 m. AMS-02 a été conçu pour l'observation directe de rayons cosmiques avec des énergies dans la gamme 0,5 à 4 TeV, son acceptation est d'environ 0,5 m<sup>2</sup> · sr. L'aimant permanent est la pièce maîtresse de l'instrument.

Dans son puissant champ magnétique les particules chargées subissent une force de Lorenz et sont déviées lorsqu'elles traversent les différents plans de détecteurs. L'aimant permanent d'AMS (en néodyme-fer-bore) produit un champ magnétique 3 000 fois plus puissant que celui de la Terre.



**Fig.2.** Schéma de principe d'un détecteur de rayons cosmiques dans l'espace tel qu'AMS-02.

<sup>2</sup> 1 GeV = 10<sup>9</sup> eV ; 1 TeV = 10<sup>12</sup> eV; 1 PeV = 10<sup>15</sup> eV et 1 EeV = 10<sup>18</sup> eV. L'énergie cinétique d'un moustique en vol étant environ 1 TeV.

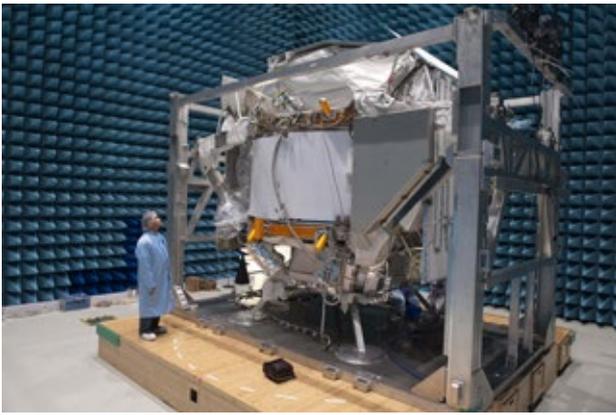


Fig.3. L'AMS-02. (crédit ESA).

Le trajectographe mesure les coordonnées des particules déviées dans le champ magnétique de l'aimant permanent, permettant ainsi de reconstruire leur trajectoire. Dans AMS, il est composé de neuf plans de détecteurs silicium à micro-pistes, lu par 200 000 canaux électroniques ! Lorsqu'une particule chargée crée des paires d'électron-trous dans ces semi-conducteurs, les porteurs de charge libérés migrent vers les deux pistes (électrodes) les plus proches, permettant de localiser l'interaction dans chaque plan de détecteur à 10 micromètres près. La courbure de la trajectoire ainsi déterminée est une mesure pour la « quantité de mouvement divisée par charge de la particule », y compris le signe de la charge (positif ou négatif) – c'est le moyen pour identifier des particules d'antimatière (comme le positron – même masse que l'électron, mais de charge opposée).

Dans le détecteur à rayonnement de transition (TRD), lorsqu'une particule chargée à haute énergie se déplace d'un milieu à un autre, elle émet un « rayonnement de transition » sous forme de rayons X. Le TRD est composé d'un radiateur dans lequel des photons visibles (ou UV) sont générés par les particules chargées relativistes, et d'un photodétecteur qui observe ces photons visibles. Un TRD permet de distinguer entre les électrons et hadrons (protons) à des énergies très élevées.

Disposés de part et d'autre de l'aimant permanent, les détecteurs de temps de vol (TOF) font office de chronomètre. Dans les compteurs à scintillation du TOF, le passage d'une particule ionisante excite des molécules, celles-ci émettent immédiatement des impulsions lumineuses par fluorescence. La lumière visible/UV est ensuite détectée par des photomultiplicateurs. Les détecteurs TOF ont plusieurs fonctions : ils avertissent (« triggent ») les autres détecteurs de l'arrivée d'un rayon cosmique incident, la vitesse ( $\beta = v / c$ ) d'une particule

est mesurée avec une résolution de 4 %, ce qui discrimine également entre les particules montantes et descendantes ; enfin, la charge des particules est obtenue par des mesures de leur perte d'énergie par ionisation.

Le détecteur RICH (Ring-Imaging Cherenkov) permet de mesurer à la fois la charge et la vitesse des particules avec une grande précision (meilleure que 0,1 % pour la vitesse). Une particule chargée qui traverse le verre du détecteur à une vitesse proche de la lumière (supérieure à la vitesse de la lumière dans le verre, ou dans l'eau, comme dans l'humeur vitreuse des astronautes de la mission Apollo mentionné ci-dessus) émet un rayonnement Cherenkov – c'est un phénomène équivalent au passage du mur du son. La lumière Cherenkov émise prend la forme d'un cône avec un angle d'ouverture proportionnel à la vitesse de la particule.

Dans AMS-02, la lumière de Cherenkov est générée dans des radiateurs en aérogel de silice et en fluorure de sodium. Le cône de lumière résultant prend la forme d'un cercle ou d'une ellipse dans le plan de l'imageur RICH, constitué de 10 880 photomultiplicateurs.

Le calorimètre électromagnétique (ECAL) est un instrument d'imagerie tridimensionnel composé de 540 kg de plomb pris en sandwich avec 50 000 fibres scintillantes. Sa fonction est d'arrêter complètement les particules, en mesurant leur énergie et leur direction avec une grande précision. La résolution énergétique ECAL est d'environ 2 % et la résolution angulaire est de 0,5° (pour  $E > 100$  GeV). Ensemble avec le trajectographe, l'ECAL permet par exemple de distinguer un positron parmi jusqu'à 100 000 protons.

■

#### Les rayons cosmiques dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut ([clea-astro.eu/archives](http://clea-astro.eu/archives)).

Il y a très peu d'articles abordant ce sujet dans les Cahiers Clairaut.

- L'effet Cérenkov dompté au LP2I. CC n° 134 (2011).
- L'exploration de la planète Mars à l'aube du 3<sup>e</sup> millénaire. CC n° 127 (2009). Où l'on explique comment les rayons cosmiques sont utiles pour détecter l'eau sous la surface de Mars.