



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com



## Ultra-high-energy cosmic rays / Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie

## Foreword

*From the ankle to the tip of the spectrum*

The nature, the origin, and the observation of ultra-high-energy cosmic rays (UHECR) constitute a triple scientific challenge. A challenge in astrophysics, as the topology of the most powerful astrophysical objects known has to be organized nearly ideally to transmit macroscopic energy (at the Joule level) to elementary particles. A challenge in instrumentation and technology, since the very low flux of cosmic rays at these energies, less than a particle per kilometre square and per century, imposes the necessity to instrument surfaces of thousands of kilometre squares with robust, autonomous and state-of-the-art detection techniques. A challenge in particle physics, since the centre of mass energy available in the first few interactions of the cosmic rays with the atoms of the atmosphere is far beyond the reach of man-made accelerators and may open new channels in physics unavailable to terrestrial machines. A triple challenge that over the past decades bonded together the fields of astrophysics, high-energy physics, and cosmology into a new research domain, known today as astroparticle physics.

Above about  $10^{15}$  eV of energy, the cosmic ray flux is insufficient to allow a direct detection of the primary particle from space; instead one must study cosmic rays through the extensive air shower they generate in the atmosphere. Large-area detectors, covering from one to a few tens of square kilometres, have been constructed. One of them, KASCADE, located in Germany, and its extension KASCADE-Grande, allowed a detailed study of the “knee”, a steepening in the energy spectrum of cosmic rays occurring above a few  $10^{15}$  eV. Composition measurements together with the production of mass specific (or mass groups such as light, medium, and heavy) spectra lead to a widely shared (but not exclusively) interpretation that the knee is the mark of the loss of confinement of cosmic rays (at least a first population of them accelerated at super nova remnants' sites) by the Galactic magnetic fields.

At the end of the 20th century, the experimental field at the highest energies was dominated by two observatories of comparable (of the order of  $100 \text{ km}^2$ ) size, Fly's Eye, located in North America, and AGASA, located in Japan. Using different detection techniques, fluorescence telescopes for Fly's Eye and a ground array of particle detectors for AGASA, their data led to radically different views on the highest energy part of the cosmic ray spectrum. On the one hand, AGASA did not observe any departure from a steady power law up to the highest energies; on the other one, Fly's Eye saw some indication of a cut-off, while at the same time it recorded the highest energy event ever observed, with almost 50 joules of energy. New observatories with much larger aperture were needed to follow up those measurements.

The HiRes telescopes, an enlarged and improved version of Fly's Eye, were a first step, soon followed by what are still today the world's largest cosmic ray observatories: the Pierre Auger Observatory, covering  $3000 \text{ km}^2$ , in the southern hemisphere, and the Telescope Array, covering  $700 \text{ km}^2$ , in the northern hemisphere. These new observatories are not only larger: they also combine the fluorescence and ground array detection techniques into a single instrument. The data from these observatories have allowed one to measure the cosmic ray energy spectrum with unprecedented precision. Two spectral features are clearly identified from these measurements. The first one, the “ankle”, corresponds to a flattening of the spectrum, with a sharp increase of about 0.6 units of the spectral index occurring at cosmic ray energy just below  $1 \text{ J}$ . The second feature is an exponential extinction of the flux, the cut-off, which takes places at energies above about  $8 \text{ J}$ .

Indeed, soon after the discovery of the cosmic microwave background (CMB), Greisen, Zatsepin and Kuzmin (GZK) predicted a spectral cut-off, due to the photo-production of pions in the interaction of protons against the CMB at these energies. In addition to a cut-off in the energy spectrum, this mechanism also produces a large number of very high-energy photons and neutrinos, called cosmogenic, that could be detected. However, the nature of the highest energy cosmic rays is still unknown and they could be mostly medium or heavy nuclei rather than just protons. In this case, the observed cut-off could be a consequence of the limited acceleration power of the sources rather than the GZK prediction. Given the difficulties to identify sources and mechanisms able to transfer energies of several tens of Joules to a proton, this is not totally unexpected. In the same spirit, the ankle could be the sign of a Galactic to extra-galactic dominance in the cosmic ray flux or again the signature of a propagation effect affecting protons, namely the pair creation processes against the CMB.

As often in research, the commissioning and the exploitation of new instruments answer as many questions as they open new ones. Although the recent data have shown a clear evidence for an end in the cosmic ray energy spectrum, the everlasting mystery of the nature and origin of those rays remains. More comprehensive measurements, with multi-component data, are needed to make further progress. Both Auger and Telescope Array plan for an upgrade of their detection capabilities. In addition, Ice-Cube, the neutrino telescope at the South Pole, may have discovered the first cosmic neutrinos, thus opening a complementary window into the ultra-high-energy universe. The intermediate energy region, between  $10^{17}$  and  $10^{19}$  eV (a few percent of a Joule to a Joule), may be the key to unravel these last mysteries. The composition evolution, the anisotropy patterns and the amount of cosmogenic neutrinos and photons in the particle spectra in this energy range are invaluable tools to understand the ankle's and the cut-off's origin. This region deserves special attention in the near future.

In this dossier of the *Comptes rendus Physique*, we present the major experimental results of the past decade and discuss their possible interpretations and outcome. We describe the interplay between the astrophysics of the sources, the propagation effects, including magnetic field deviations, and the high-energy particle physics driving the interaction in the atmosphere. We hope that our reader will, through these contributions, feel the richness of astroparticle physics and share part of the enthusiasms of the physicists studying these cosmic messengers.

Avant-propos

## De la cheville à l'extrémité du spectre

L'observation puis la détermination de la nature et de l'origine des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (RCUHE) constituent un triple défi scientifique. Un défi en astrophysique, car le transfert de quantités macroscopiques d'énergie (qui s'expriment en joules) à des particules élémentaires demande une configuration quasi idéale des objets astrophysiques les plus puissants. Un défi instrumental et technologique, car les flux extrêmement faibles à ces énergies, moins d'une particule par kilomètre carré et par siècle, imposent l'instrumentation de surfaces de plusieurs milliers de kilomètres carrés avec des détecteurs robustes, autonomes et à la pointe du savoir-faire. Enfin, un défi en physique fondamentale, car l'énergie dans le centre de masse des premières collisions dans l'atmosphère est considérable et bien au-delà de ce que peuvent produire nos accélérateurs les plus puissants : elle pourrait donner lieu à des phénomènes physiques inconnus jusqu'ici. Un triple défi qui, au cours des dernières décennies a réuni astrophysique, physique des hautes énergies et cosmologie dans un nouveau domaine scientifique, celui de la physique des astroparticules.

Au-dessus d'environ  $10^{15}$  eV, le flux des rayons cosmiques est trop faible pour être mesuré directement depuis l'espace. Au-delà de cette énergie, leur étude se fait donc à travers les grandes gerbes atmosphériques qu'ils produisent lors des collisions dans l'atmosphère. De grands détecteurs, couvrant des surfaces allant d'un à plusieurs dizaines de kilomètres carrés, furent construits. L'un d'eux, KASCADE, situé en Allemagne, puis son extension KASCADE-Grande, a permis l'étude détaillée du « genou », un infléchissement de la loi de puissance associée au spectre en énergie des rayons cosmiques et se situant à quelque  $10^{15}$  eV. Les mesures de la composition des rayons cosmiques ainsi que des spectres associés à chacun des primaires (ou groupes de primaires : légers, moyens, lourds) permettent d'interpréter ce genou comme la signature de la fin du confinement des rayons cosmiques (en tous cas d'une première population d'entre eux accélérés auprès des restes de supernovæ) par les champs magnétiques galactiques.

À la fin du XX<sup>e</sup> siècle, la situation expérimentale aux plus hautes énergies était dominée par deux observatoires de tailles comparables (de l'ordre de  $100 \text{ km}^2$ ), Fly's Eye, situé en Amérique du Nord, et AGASA, situé au Japon. Utilisant des techniques de détections différentes, des télescopes à fluorescence pour Fly's Eye et un réseau de détecteurs de particules au sol pour AGASA, leurs données conduisaient à deux visions radicalement différentes de l'extrémité du spectre en énergie. D'un côté, celles d'AGASA montraient un spectre en loi de puissance se prolongeant jusqu'aux plus hautes énergies ; de l'autre, celles de Fly's Eye donnaient un écart grandissant avec une simple loi de puissance, semblant indiquer la présence d'une coupure aux plus hautes énergies. Malgré cette indication de coupure, Fly's Eye avait pourtant enregistré l'événement le plus énergétique jamais observé, atteignant presque 50 joules. De nouveaux observatoires, beaucoup plus grands, devaient être construits pour poursuivre ces études.

Les télescopes HiRes, une version agrandie et améliorée de Fly's Eye furent un premier pas, rapidement suivi par ceux qui sont encore aujourd'hui les observatoires de rayons cosmiques les plus grands du monde : l'observatoire Pierre-Auger, couvrant une surface de  $3000 \text{ km}^2$  dans l'hémisphère sud, et le Telescope Array, couvrant  $700 \text{ km}^2$  dans l'hémisphère nord. Ces nouveaux observatoires ne sont pas seulement plus grands ; ils associent également les techniques de fluorescence et les réseaux de détecteurs au sol dans un seul et même dispositif. Les données de ces nouveaux observatoires ont permis la mesure du spectre en énergie avec une précision inégalée. Deux caractéristiques, la « cheville » et la « coupure » ressortent clairement de ce spectre. La cheville est un redressement brutal de la loi de puissance qui régit le spectre et marque une augmentation juste en dessous du joule, d'environ 0,6 unité de l'indice spectral. La coupure est une extinction exponentielle du flux aux plus hautes énergies, soit au-delà de 8 joules environ.

Ces caractéristiques spectrales ont plusieurs interprétations. La coupure est-elle celle prédite par Greisen, Zatsepin et Kuzmin (GZK) en 1963, peu après la découverte du fond diffus cosmologique (CMB), et qui a pour origine l'interaction des protons cosmiques avec les photons du CMB ? Ou bien signe-t-elle la limite d'accélération des sources ? Étant données les difficultés rencontrées pour expliquer que des sources astrophysiques puissent transférer plusieurs joules à des protons, cette

interprétation n'est pas dénuée de sens. La composition des rayons cosmiques les plus énergétiques est encore inconnue ; si elle est dominée par des noyaux lourds plutôt que simples protons, l'une ou l'autre de ces interprétations devient la plus probable. Notons, par ailleurs, que le mécanisme GZK prévoit aussi la production d'un grand nombre de photons et de neutrinos de très hautes énergies, dits « cosmogéniques », qui sont en principe détectables, alors que, dans le cas de noyaux lourds, leur flux est beaucoup plus modeste. De la même manière, la cheville peut correspondre à plusieurs interprétations. Dans un cas, elle représente la transition de la domination du flux par les sources galactiques à la domination par les sources extragalactiques. Dans l'autre elle signe un autre effet de propagation lié cette fois à la production de paires  $e^+/e^-$  par les protons cosmiques lors de leurs collisions avec les photons du CMB.

Comme souvent en recherche, la construction et l'exploitation de nouveaux instruments apportent autant de nouvelles questions que de réponses. Bien que les données les plus récentes aient clairement permis l'observation de la limite du spectre des rayons cosmiques, le sempiternel mystère de leur nature et de leur origine demeure. Des mesures plus complètes basées sur des données issues à la fois des composantes hadroniques et électromagnétiques des cascades sont indispensables pour faire de nouveaux progrès. Aujourd'hui, les physiciens d'Auger et du Telescope Array étudient une modernisation de leurs instruments, tandis que Ice-Cube, le télescope à neutrinos au pôle sud, semble avoir découvert les premiers neutrinos cosmiques, ouvrant une nouvelle fenêtre sur l'Univers aux ultra-hautes énergies. En dehors de l'extrémité du spectre (au-delà de  $10^{19}$  eV), la région intermédiaire, entre  $10^{17}$  et  $10^{19}$  eV (de quelques pourcents de joule à un joule) mérite à court terme notre plus grand intérêt. Elle pourrait être la clé des derniers mystères, car l'évolution de la composition, des motifs d'anisotropie et la mesure du flux de photons et de neutrinos cosmogéniques sont, dans cet intervalle d'énergie, des outils irremplaçables pour comprendre l'origine de la cheville, mais aussi celle de la coupure.

Ce dossier des *Comptes rendus Physique* présente les résultats expérimentaux les plus importants de la décennie et discute leurs interprétations possibles. Les relations entre l'astrophysique des sources, les effets de propagation dans l'Univers, en incluant les champs magnétiques, et la physique des hautes énergies responsable des interactions dans l'atmosphère y sont également décrites. J'espère qu'en lisant ces contributions, chacun sentira la richesse de la physique des astroparticules et partagera l'enthousiasme de ceux qui étudient ces messagers cosmiques.

Antoine Letessier-Selvon

Available online 13 April 2014