

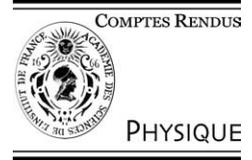


ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Physique 5 (2004) 417–421



Ultimate energy particles in the Universe/Particules d'énergies ultimes dans l'Univers

Foreword

Many words such as *puzzle*, *mystery* or *enigma* have been used in the recent past about the ultra high energy cosmic rays (UHECR), namely cosmic rays with energies above 10^{19} eV. This volume intends to explain why those particles were considered for more than half a century as being of mysterious origin and unknown nature, and how the particle astrophysics community intends to find solutions to the questions that remain unanswered in this field.

Ultra high energy cosmic rays (UHECR) are impossible to detect directly (i.e. by satellite borne detectors, before interacting with the atmosphere) for two reasons. The first is an extremely low flux so that there is no chance that a detector of a few square-meters gets hit by one even in a lifetime. The second is that even if this happens, the particle would just cross the detector leaving no information on its energy or identity. Fortunately, Nature provides us with a quite appropriate detector, namely the atmosphere, a reasonable calorimeter. Most cosmic rays interact with the higher layers of the Earth's atmosphere. The most energetic of them generate an *extensive air-shower* (EAS), more explicitly a cascade of secondary particles, partly absorbed in the atmosphere and partly reaching the ground. The UHECR detection consists in piecing together the information one can get from these secondary particles and reconstructing three properties of the primary cosmic ray: the direction from where it comes (or seems to come), its energy, and its nature (or 'chemical composition'). Two detection techniques are currently used to this effect. The so called 'surface detectors' get the information by sampling a minuscule amount of the billions of secondary particles (mainly photons and electrons) hitting the ground. The 'fluorescence telescopes' measure the energy deposited in the atmosphere by the charged particle component (electrons) of the EAS, through the excitation of the nitrogen atoms which emit a spectrum of ultra-violet fluorescence light while returning to their ground state. One can summarize these two detection techniques by saying that, when connected to some fast electronics, the ground detectors observe the time development of a transverse section of the EAS, while the fluorescence telescopes do the same by observing the EAS longitudinally. When both detection techniques are used together, we have what is called a 'hybrid detector'. To understand the difficulties of such measurements, let us give some figures in the energy range we are interested in (10^{19} – 10^{20} eV). A ground detector samples about one out of one million particles reaching the ground, those being the products of countless secondary interactions taking place between the primary interaction and the ground level. To a fluorescence telescope, an EAS looks like a 40 watt light-bulb crossing the sky at the velocity of light and emitting a variable UV radiation, sometimes at distances as large as 40 kilometers (even hundreds of kilometers for some future detectors). It should be easy to understand that going from such indirect measurements to the properties of the primary cosmic ray is a technical and conceptual challenge. One of the main difficulties comes from the fact that the EAS must be modeled as precisely as possible so that one can go from the very fragmentary information collected by the detector to the properties of the primary particle. Since we are dealing with energies well above anything observable e.g. with accelerator experiments, this constitutes one of the main sources of the systematic errors that mar, in particular, the energy measurement and render very difficult the identification of the primary cosmic ray. The article by P. Sommers [1] gives an overview of the EAS properties and outlines the basic principles used in their detection.

The easiest and the most precise parameter to be inferred from the data is the direction reconstruction. Unfortunately, the information that could be used to find the direction of the source becomes hard to use if the cosmic rays are charged particles, as is probably the case for the most energetic ones. The propagation through the galactic and extra-galactic magnetic fields, see the article by T. Stanev [2], is expected to blur the images of possible point sources, or, depending on the badly known field intensities, even completely dilute them. A review of the current literature [2–4] suggests that deflection by extra-galactic magnetic fields is currently hard to quantify. It may not be possible to do 'particle astronomy' along most lines of sight, especially if a significant heavy nucleus component is present above 10^{19} eV, a possibility mentioned by R. Engel and H. Klages [5]. In this case extensive Monte Carlo simulations including nuclei and based on constrained large scale structure models will be necessary to fully exploit data from future instruments such as the Pierre Auger Observatory [6] and the EUSO project [7]. This may allow to use the information on possible anisotropies of the incoming directions to correlate the UHECR with the mass distribution or the large scale structures in the vicinity of our galaxy, see the article by R. Clay, B. Dawson and G. Thornton [8].

The energy measurement is of paramount importance to the understanding of the origin of UHECR, as outlined by S. Yoshida [9]. Indeed, a precise reconstruction of the energy spectrum gives very strong hints as to the initial acceleration

mechanism, after propagation effects are taken into account. The theory of these mechanisms is a complicated subject which is still not sufficiently well understood to be sure it can explain the highest energy cosmic rays, as demonstrated by M. Ostrowski [10]. Besides the Fermi acceleration there are some interesting, more unconventional, ideas on how cosmic rays may be accelerated in force-free magnetic field reconnection described by S.A. Colgate and H. Li [11].

Furthermore, the identity of the cosmic ray (is it charged or neutral?, if charged, is it a heavy or light nucleus, or even some yet speculative particle?) is also a powerful signature to discriminate whole families of production models. As an example, a reliable confirmation that the UHECR flux contains a significant heavy nucleus component would kill the totality of the so-called ‘top–down’ scenarios where UHECR are produced in decays of massive relics of the early Universe, see the article by M. Kachelrieß [12]. The same is true if no experimental hints on a significant γ -ray component can be found. Unfortunately, this is also the most difficult information to deduce from the observation of the EAS, as explained in the discussions by P. Billoir and P. Sommers [13] and R. Engel and H. Klages [5].

UHECR are linked to other channels, namely γ -rays and neutrinos, which are either produced as secondaries by the interaction of accelerated hadronic primaries, or as accompanying primaries in particle physics mechanisms involving pion production by quark fragmentation. Neutrino and γ -ray fluxes have been detected or constrained at various energies, both by cosmic ray experiments and by dedicated neutrino and γ -ray telescopes. These data constrain UHECR scenarios more and more. For example, improved analysis of the data of the EGRET experiment which operated on board the Compton γ -ray satellite significantly reduced estimates of the true extra-galactic diffuse γ -ray background at GeV energies [14]. This background acts as a calorimeter of electromagnetic energy injected above $\sim 10^{15}/(1+z)$ eV at redshift z which, after a few hundred Mpc, cascades down to the GeV regime. These estimates imply that scenarios producing considerably more photons than hadrons, such as extra-galactic top–down scenarios and the Z-burst mechanism, cannot explain all of the highest energy cosmic ray flux. Most of the quarks produced in these mechanisms would fragment into pions rather than nucleons, so that more γ -rays (and neutrinos) than cosmic rays are produced. Overproduction of GeV γ -rays can be avoided by assuming the sources in an extended Galactic halo with a high $\gtrsim 10^3$ overdensity compared to the average cosmological source density, which would also avoid the GZK cutoff. These scenarios, however, start to be constrained by the anisotropy they predict because of the asymmetric position of the Sun in the Galactic halo, for which there are no indications in present data, as explained by M. Kachelrieß [12].

In the future, γ -ray experiments such as GLAST [15] may resolve part of the isotropic GeV γ -ray background into astrophysical point sources, thereby further reducing the possible contribution to the true diffuse GeV γ -ray background of non-astrophysical sources related to new physics. Apart from improved constraints on new physics, this would be important news as it will start to constrain even normal acceleration scenarios which produce photons via the decay of neutral pions, themselves produced by interactions of primary nuclei with baryons and low energy photons.

Processes involving pion production always produce comparable amounts of neutral and charged pions, the latter decaying essentially into neutrinos which, contrary to photons, do not appreciably lose energy. The energy fluence in diffuse ultra-high energy neutrinos, therefore, can not be higher than the energy in the diffuse GeV photon flux. New estimates of the latter thus have direct relevance also for the prospects of detection of extra-galactic high energy neutrinos with next-generation instruments [16]. Since neutrinos have weak cross sections in the Standard Model, they may provide a sensitive probe of new physics: enhanced cross sections can be probed by comparing rates of deeply penetrating showers in the atmosphere and Earth skimming neutrino induced events, see M. Kachelrieß [12].

As noted in the same article [12], propagation may also be modified by new physics, most notably Lorentz symmetry violation. This effect can reduce energy loss rates and may be tested by searching correlations of cosmic rays above the GZK cutoff with sources at cosmological distances.

Given this range of physics and astrophysics concerned, it is no surprise that the currently rather sparse data available on UHECR, see R. Engel and H. Klages [5], are of little help to understand the nature and origin of these puzzling objects. The ongoing and future experiments, such as the Pierre Auger Observatory now under construction in the Argentinian Pampa [6], have still a full crop to harvest, be it in the fields of astrophysics, cosmology or fundamental interactions.

Avant-propos

Au cours de ces dernières années on a beaucoup utilisé des mots tels que casse-tête, énigme ou mystère en parlant des rayons cosmiques d’ultra-haute énergie (RCUHE). On désigne ainsi les rayons cosmiques dont l’énergie excède 10^{19} eV. Ce volume essaiera d’expliquer pourquoi l’origine de ces particules est considérée comme étant mystérieuse et leur nature inconnue depuis plus d’un demi-siècle, et quels moyens se donne la communauté des chercheurs pour répondre à l’ensemble des questions restées encore ouvertes dans ce domaine.

Les RCUHE ne peuvent pas être détectés directement (par exemple à l’aide d’instruments embarqués) avant d’interagir avec l’atmosphère. À cela, deux raisons. Tout d’abord, leur flux est tellement faible que la probabilité que l’un d’eux touche un détecteur de quelques mètres-carré est totalement négligeable, même si on attend toute une vie. Ensuite, si cela devait arriver,

la particule en question traverserait le détecteur sans y laisser aucune indication utilisable pour mesurer son énergie ou pour l'identifier. Heureusement, la Nature met à notre disposition un détecteur intéressant, l'atmosphère terrestre, qui constitue un calorimètre tout à fait approprié. La plupart des rayons cosmiques interagissent dans les hautes couches de l'atmosphère. Les plus énergétiques d'entre eux produisent ainsi une gerbe atmosphérique, c'est-à-dire une cascade de particules secondaires dont une partie est absorbée dans l'atmosphère mais dont certaines parviennent au niveau du sol. La détection des RCUHE consiste à rassembler les informations fragmentaires qu'on peut tirer de ces particules secondaires pour remonter à trois propriétés essentielles du rayon cosmique primaire : la direction dont il vient (ou semble venir), son énergie et son identité (ou « composition chimique »). Pour ce faire, deux techniques de détection courantes sont utilisées. Les « détecteurs de surface » collectent l'information en échantillonnant une proportion infime de toutes les particules secondaires qui arrivent au niveau du sol (essentiellement des photons et des électrons). Les « télescopes à fluorescence » de leur côté mesurent l'énergie déposée dans l'atmosphère par les particules chargées de la gerbe (électrons). Ce transfert d'énergie se fait par l'excitation des atomes d'azote qui, en retournant à leur état fondamental émettent un rayonnement de fluorescence dans l'ultra-violet. On peut résumer ces deux techniques en disant que, équipés d'électronique rapide, les détecteurs de surface observent l'évolution en temps d'une tranche transverse de la gerbe alors que les télescopes à fluorescence fond de même en « filmant » la gerbe longitudinalement. Quand les deux techniques sont combinées dans une même expérience, on dit qu'on travaille avec un « détecteur hybride ». Pour bien comprendre les difficultés dans l'utilisation de telles techniques, donnons quelques chiffres dans le domaine d'énergie qui nous intéresse (10^{19} – 10^{20} eV). Un détecteur de surface échantillonne une particule sur un million parmi les centaines de milliards qui atteignent le sol, chacune de celles-ci étant de son côté le sous-produit d'innombrables interactions secondaires ayant eu lieu entre l'interaction primaire et le détecteur. Une gerbe atmosphérique vue par un télescope à fluorescence est l'équivalent d'une ampoule de 40 watts traversant le ciel à la vitesse de la lumière tout en émettant un rayonnement variable dans l'ultra-violet, et ce à des distances qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilomètres (et même plusieurs centaines dans le cas de certains détecteurs du futur). On devrait donc comprendre facilement qu'à partir de données aussi indirectes remonter aux propriétés du rayon cosmique primaire constitue un défi aussi bien technique que méthodologique. Une des difficultés supplémentaires dans cette chaîne de traitement de données vient du fait que la gerbe doit être modélisée d'une manière aussi précise que possible pour remonter de ces informations très fragmentaires collectées par les détecteurs aux caractéristiques de la particule primaire. Or le domaine d'énergie de nos rayons cosmiques se trouve très au-delà de toutes celles qu'on peut atteindre avec, par exemple, les accélérateurs les plus puissants qu'on puisse imaginer. L'absence de vérification expérimentale des modèles d'interaction à ces énergies extrêmes constitue l'une des principales sources d'incertitudes systématiques qui entachent en particulier la mesure de l'énergie et rendent extrêmement difficile l'identification des primaires. L'article de P. Sommers [1] résume les propriétés des gerbes atmosphériques et décrit brièvement les principes de base servant à leur détection.

Parmi les paramètres calculés à partir des données, celui dont la mesure est la plus simple est l'angle d'incidence du rayon cosmique. Cette information qui devrait servir à trouver la direction de la source devient malheureusement d'usage difficile si le rayon cosmique est chargé, ce qui probablement est le cas pour les plus énergétiques d'entre eux. Le parcours des rayons cosmiques à travers les champs magnétiques extra-galactiques et galactiques (voir l'article de T. Stanev [2]) estompe très probablement l'image d'éventuelles sources ponctuelles ou même, selon l'intensité toujours mal connue des champs, la dilue totalement. Les travaux menés dans ce domaine [2–4] ont tendance à conclure que la déviation par les champs magnétiques extra-galactiques est difficile à évaluer. Il se pourrait que l'astronomie par rayons cosmiques soit impossible dans la plupart des directions de visée, et plus particulièrement s'il existe une proportion significative de noyaux lourds parmi eux, une possibilité envisagée par R. Engel et H. Klages [5]. Pour tirer le meilleur bénéfice des expériences futures telles que l'Observatoire Pierre Auger [6] et le projet EUSO [7], il sera donc nécessaire de faire appel à des simulations incluant des noyaux lourds et basées sur des modèles de structure à grande échelle contraints par les données existantes. On pourrait alors en déduire des informations sur les anisotropies des directions d'incidence des rayons cosmiques pour les corrélérer avec la distributions de masses ou les grandes structures observables dans le voisinage de notre galaxie (voir l'article de R. Clay, B. Dawson et G. Thornton [8]).

La mesure de l'énergie est d'une importance cruciale pour comprendre l'origine des RCUHE, comme expliqué par S. Yoshida [9]. En effet, une reconstruction précise du spectre d'énergie donne des indications très précieuses sur les mécanismes d'accélération à la source, une fois que les effets de propagation sont pris en compte. La théorie de ces mécanismes est un sujet complexe et non encore bien compris, ainsi que le démontre M. Ostrowski [10]. En plus de l'accélération de Fermi, il existe des idées moins conventionnelles, qui tentent d'expliquer comment les rayons cosmiques peuvent être accélérés, par exemple, dans des reconnexions de champs sans force, développées par S. A. Colgate et H. Li [11].

Enfin, l'identité du rayon cosmique (est-il chargé ou neutre ?, s'il est chargé, est-ce un noyau léger ou lourd ?, est-ce même une particule encore hypothétique ?) est également une signature puissante, qui peut permettre d'éliminer des familles entières de modèles de production. Par exemple, l'existence irréfutable d'une composante en noyaux lourds parmi les rayons cosmiques tuerait la totalité des modèles ou théories appelés « top-down » qui font appel à un scénario où les RCUHE seraient les produits de la désintégration de particules super-massives dont l'origine remonterait aux premiers instants de l'Univers (voir l'article

de M. Kachelrieß [12]). Malheureusement, l'identification est l'information la plus difficile à extraire des données, comme l'expliquent P. Billoir et P. Sommers [13] d'une part, R. Engel et H. Klages [5] d'autre part.

La physique des RCUHE est reliée à celle d'autres secteurs comme l'astronomie gamma ou les neutrinos. Rappelons que seules des particules chargées peuvent être accélérées directement. Celles-ci peuvent produire des photons et des neutrinos en interagissant avec la matière environnant le site d'accélération. Un autre mécanisme possible est la création de ces particules secondaires dans une chaîne de fragmentation des quarks. Les flux de neutrinos ou de rayons gamma sont soit mesurés soit prédits dans des domaines d'énergie variés, par des expériences de rayons cosmiques ou par des détecteurs spécifiques. Ces données mettent des limites de plus en plus étroites aux scénarios sur les RCUHE. Par exemple, une analyse poussée des données fournies par le détecteur EGRET embarqué sur le satellite Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) a permis de réduire radicalement les évaluations du fond gamma diffus extra-galactique aux énergies de l'ordre du GeV [14]. Ce fond joue le rôle d'un calorimètre électromagnétique sur des énergies incidentes supérieures à $\sim 10^{15}/(1+z)$ eV depuis des distances correspondant au décalage vers le rouge z . Par une cascade d'interactions, cette énergie se dégrade pour atteindre, après quelques centaines de Mpc, le domaine du GeV. Ces prédictions ont pour conséquence qu'aucun scénario où le taux de production de photons est nettement supérieur à celui de hadrons (modèles « top-down » ou mécanisme dit de « Z-burst » – production suivie de désintégration du boson Z) ne peut expliquer la totalité du flux de rayons cosmiques d'énergies extrêmes. La plupart des quarks produits dans de tels mécanismes se fragmenteraient majoritairement en pions (et non en nucléons) si bien que ce sont les gammas et les neutrinos qui domineraient les flux. La surproduction de gammas d'énergies voisines du GeV peut toutefois être évitée si on fait l'hypothèse que les sources sont localisées dans un halo galactique étendu avec une surdensité $\gtrsim 10^3$ par rapport à la densité cosmologique moyenne. Cela contournerait également la coupure spectrale GZK. Toutefois, ces scénarios prédisent également une anisotropie due à la position centrée du Soleil par rapport au halo galactique qui ne semble pas être observée dans les données actuelles (voir article de M. Kachelrieß [12]). Des expériences futures d'astronomie gamma, comme GLAST [15] pourraient même associer une partie du fond gamma diffus du GeV à des sources astrophysiques ponctuelles. Cela diminuerait d'autant la contribution des sources non-astrophysiques (« nouvelle physique ») au fond gamma effectif du GeV. Ces résultats seront d'autant plus importants que non seulement ils mettront des limites sur la « nouvelle physique » mais ils commenceront même à contraindre les mécanismes d'accélération astrophysiques où des photons sont produits dans la désintégration de pions neutres, eux-mêmes créés dans les interactions entre les noyaux primaires et des baryons ou des photons de basse énergie.

Les processus avec production de pions conduisent toujours à des états finals où on trouve des quantités voisines de pions neutres et chargés. Ces derniers se désintègrent en produisant des neutrinos qui, contrairement aux photons, ne perdent pratiquement pas d'énergie au cours de leur propagation. Le flux d'énergie transportée par les neutrinos diffus d'ultra haute énergie ne peut donc excéder celui des photons diffus du GeV. Enfin, les estimations énergétiques des photons diffus ouvrent également des perspectives dans la détection des neutrinos extra-galactiques de haute énergie avec les grands équipements de prochaine génération [16]. En effet, les neutrinos du Modèle Standard devraient avoir des sections efficaces d'interaction faibles. Toute augmentation de section efficace au-delà des prédictions du Modèle Standard est une signature solide de « nouvelle physique ». De telles mesures seront possibles par des comparaisons entre les taux de détection de gerbes pénétrant profondément dans l'atmosphère et celles, dues à des neutrinos, arrivant sur le détecteur en incidence rasante par rapport à la surface de la Terre (voir M. Kachelrieß [12]).

L'article cité précédemment mentionne également la possibilité que des effets de nouvelle physique puissent être observés dans les phénomènes de propagation. La violation de l'invariance de Lorentz en est un exemple spectaculaire. Une telle violation a pour effet de diminuer les taux de pertes d'énergie pendant le transport et peut éventuellement être vérifiée en établissant des corrélations entre la direction des rayons cosmiques d'énergies supérieures à la coupure GZK avec des sources identifiées et se trouvant à des distances cosmologiques.

Le domaine des RCUHE peut donc avoir des ramifications dans des champs de la physique ou de l'astrophysique tellement variés qu'il est facile de comprendre que le peu de données dont nous disposons actuellement nous est de peu d'utilité dans la solution du mystère de leur origine, comme le montre l'article de R. Engel et H. Klages [5]. Les expériences en cours, comme l'Observatoire Pierre Auger actuellement en construction dans la Pampa argentine, ou en projet ont devant elles une riche récolte à moissonner. La seule question est de savoir si ce sera dans le domaine de l'astrophysique, de la cosmologie ou des interactions fondamentales.

References

- [1] P. Sommers, Extensive air showers and measurement techniques, C. R. Physique 5 (2004).
- [2] T. Stanev, Propagation of ultra high energy cosmic rays, C. R. Physique 5 (2004).
- [3] G. Sigl, F. Miniati, T.A. Ensslin, arXiv:astro-ph/0401084.
- [4] K. Dolag, D. Grasso, V. Springel, I. Tkachev, arXiv:astro-ph/0310902.

- [5] R. Engel, H. Klages, Experimental results: an update, *C. R. Physique 5* (2004).
- [6] J. Abraham, et al., Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory, *Nucl. Instrum. Meth. A* 523 (2004) 50.
- [7] For general information see <http://www.euso-mission.org>.
- [8] R. Clay, B. Dawson, G. Thornton, Directional reconstruction and anisotropy studies, *C. R. Physique 5* (2004).
- [9] S. Yoshida, Energy determination of trans-EeV cosmic rays, *C. R. Physique 5* (2004).
- [10] M. Ostrowski, Acceleration mechanisms 1: shock acceleration, *C. R. Physique 5* (2004).
- [11] S.A. Colgate, H. Li, Acceleration mechanisms 2: force-free reconnection, *C. R. Physique 5* (2004).
- [12] M. Kachelrieß, Status of particle physics solutions to the UHECR puzzle, *C. R. Physique 5* (2004).
- [13] P. Billoir, P. Sommers, Identification of the primary cosmic ray, *C. R. Physique 5* (2004).
- [14] A.W. Strong, I.V. Moskalenko, O. Reimer, [arXiv:astro-ph/0306345](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0306345).
- [15] For general information see <http://www-glast.stanford.edu>.
- [16] D.V. Semikoz, G. Sigl, [arXiv:hep-ph/0309328](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0309328).

Murat Boratav
LPNHE/CNRS/IN2P3 – Université Paris VI
4, place Jussieu
75005 Paris
France
E-mail address: boratav@in2p3.fr (M. Boratav)

Günter Sigl
GReCO, Institut d'astrophysique de Paris
98, bis boulevard Arago
75014 Paris
France
Fédération de recherche astroparticule et cosmologie
Université Paris VII
2, place Jussieu
75251 Paris cedex 05
France
E-mail address: sigl@iap.fr (G. Sigl)