

Détection des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie : Simulation du détecteur de surface

Les rayons cosmiques forment un fond astrophysique de particules non-thermiques, supposées chargées, dont les énergies observées s'étendent du MeV jusqu'à quelques 10^{20} eV. La détection dès 1962 d'un rayon cosmique d'énergie supérieure à 10^{20} eV par John Linsley et ses collaborateurs sur le site de Volcano Ranch [1], a soulevé de multiples questions qui défient encore la physique contemporaine. Si l'existence de rayons cosmiques à de telles énergies a été confirmée par d'autres expériences, ni les nombreux travaux théoriques, ni les quelques données expérimentales disponibles à ce jour, ne permettent de comprendre complètement l'origine et la nature de ce rayonnement hautement énergétique.

La problématique du rayonnement cosmique, en particulier de sa composante à ultra-haute énergie ($E \geq 10^{18}$ eV), se présente à la fois sous des aspects théoriques, phénoménologiques et observationnels. D'une part, les astrophysiciens peinent à identifier les sources et les mécanismes d'accélération capables de porter des protons ou des noyaux du milieu interstellaire à des énergies aussi extrêmes. D'autre part, l'interaction de ces astroparticules avec le fond diffus cosmologique, qui intervient lors de leur propagation dans l'Univers, devrait entraîner la suppression de leur flux au delà de 10^{20} eV. Cette caractéristique du spectre en énergie connue sous le nom de coupure GZK [2, 3], est étroitement liée à toute la physique spéculative qui gravite autour de l'existence même de ces rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (RCUHE). Enfin, la rigidité de ces particules, à savoir le rapport de leur énergie sur leur charge, conjuguée à la supposée faible intensité du champ magnétique extragalactique et à la connaissance raisonnable de sa composante galactique, rendent pertinentes les tentatives de corrélation entre leurs directions d'arrivées et leurs sites de production.

La principale limitation technique tient à la rareté des RCUHEs – typiquement 1 particule par km^2 et par siècle à 10^{20} eV – impliquant la mise en œuvre d'une surface de détection exceptionnelle pour recueillir un nombre d'événements statistiquement représentatif. Par ailleurs, l'observation des rayons cosmiques se fait au travers de l'étude des cascades de particules secondaires, conséquence du passage de ces corpuscules extrêmes au sein de l'atmosphère : les propriétés du rayonnement cosmique sont donc indirectement déduites de l'étude des gerbes atmosphériques. Grâce à la combinaison d'un réseau de 1600 cuves à effet Cherenkov associé à 24 télescopes de fluorescence, l'Observatoire Pierre Auger peut observer simultanément le développement longitudinal et latéral des gerbes atmosphériques. Le couplage de ces deux techniques permet d'affiner les reconstructions géométriques, d'intercalibrer les détecteurs et d'évaluer, en conséquence, les éventuels biais inhérents à chaque mode de détection. En outre, la surface couverte par le détecteur de surface voisine de 3000 km^2 fait de cet instrument le plus grand détecteur

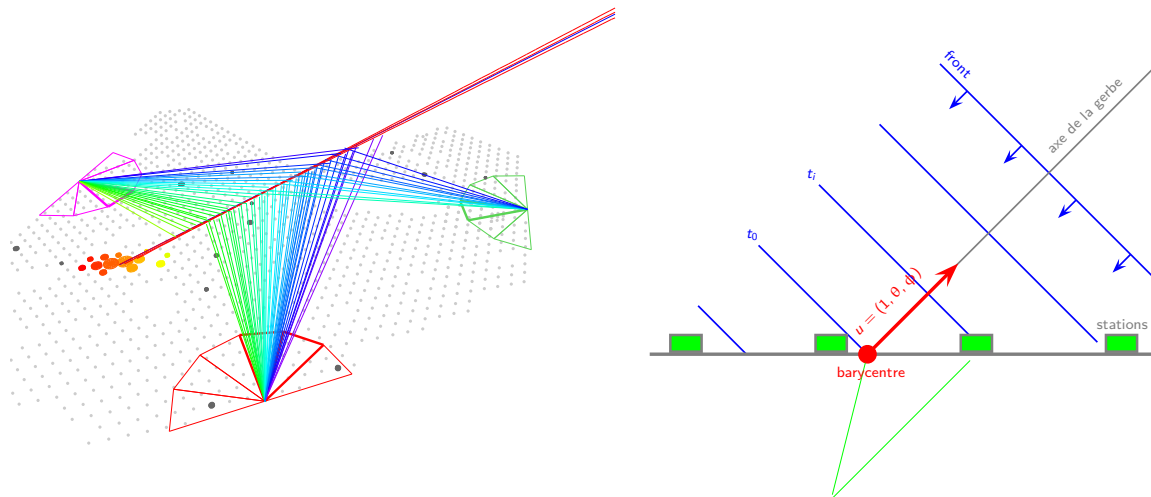


Figure 3.1 -- Vue 3D d'un événement hybride observé par l'Observatoire Pierre Auger (figure de gauche). Description géométrique du développement du front de gerbe (figure de droite).

de rayons cosmiques jamais construit.

3.1 Présentation du projet

Le but de ce projet est de simuler la réponse du **détecteur de surface** puis de reconstruire les propriétés géométriques (position du point d'impact, énergie) des gerbes atmosphériques. Le détecteur de surface se présente sous la forme d'un réseau de maille triangulaire où chaque station est séparée de ses voisines par une distance de 1.5 km. Au passage des particules secondaires de la gerbe atmosphérique, chaque station mesure le temps d'arrivée et l'amplitude du signal. Grâce à ces données, on peut ainsi déterminer :

- **la direction de la gerbe** à partir des temps d'arrivées de chacune des cuves ayant déclenchés. Trois temps sont ainsi nécessaires pour déterminer le plan de front de gerbe (cf. Figure. 3.1),
- **les coordonnées du point d'impact** sont calculées , en première approximation, comme le centre de gravité des positions des cuves pondérées par leur signal,
- **l'énergie de la particule primaire** est mesurée grâce à la distribution latérale de signal : la densité de particule et donc le signal généré dans chacune des cuves décroît avec la distance à l'axe de la gerbe r selon une loi de puissance. La valeur du signal à 1000 m dont l'unité est le VEM (*Vertical Equivalent Muon*) permet alors de déterminer l'énergie du rayon cosmique incident : 8 VEM sont ainsi équivalents à une gerbe de 10^{18} eV.

3.1.1 Génération et simulation d'événement

Un événement est caractérisé par l'énergie E de la particule primaire, sa direction (θ, ϕ) ainsi que le point d'impact $I(x_i, y_i)$. La première partie du projet consiste en la simulation d'une part, de gerbes atmosphériques et d'autre part, de la réponse du détecteur de surface. La génération des événements consiste à tirer aléatoirement des valeurs pour les variables $(E, \theta, \phi, x_I, y_I)$: les valeurs d'énergie E seront uniformément comprises entre 10^{18} eV et 10^{20} eV tandis que l'angle θ sera généré selon une distribution en $\cos \theta$.

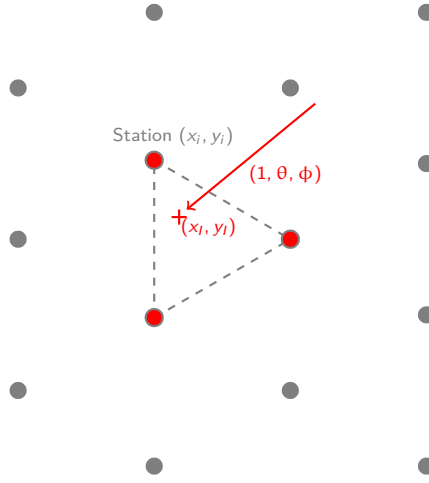


Figure 3.2 -- Représentation d'un réseau de surface constitué de 3 cuves.

Dans un premier temps, le détecteur de surface sera uniquement constitué de 3 cuves qui formeront une maille élémentaire du réseau (cf. Figure. 3.2). Chaque cuve sera atteinte à un temps t_i proportionnel à la distance séparant la cuve de l'axe de la gerbe

$$t_i = \frac{IH_i}{c} = \frac{\vec{IS}_i \cdot \vec{a}}{c}$$

où $\vec{a} = (1, \theta, \phi)$ Le signal s_i , exprimé en VEM, sera simulé en tenant compte de la distribution latérale du signal selon

$$s_i = 8|_{\text{VEM}} \times \frac{E}{10^{18} \text{ eV}} \times \left(\frac{d_{\perp}^i}{1000 \text{ m}} \right)^{-1.3}$$

où $d_{\perp}^i = \sqrt{IS_i^2 - IH_i^2}$ est la distance perpendiculairement à l'axe de la gerbe.

3.1.2 Reconstruction des événements

Étant donné les informations déduites du détecteur de surface, on déterminera le point d'impact de la gerbe en calculant le barycentre des positions des cuves pondérées par le signal. L'énergie de la gerbe sera calculée en ajustant la distribution latérale du signal.

Les résultats obtenus seront comparés aux données simulées en générant un grand nombre d'événement. On discutera les biais ainsi que la résolution en énergie en établissant les distributions des écarts relatifs en énergie et celles du point d'impact.

Dans un second temps, on pourra considérer un réseau de cuve plus dense et on évaluera l'évolution des précédentes quantités en fonction du nombre de stations.

References

- [1] J. Linsley, *Evidence for a Primary Cosmic-Ray Particle with Energy 10^{20} eV*", Physical Review Letters, vol. 10, pp 146-148 (1963) 1
- [2] K. Greisen, *End to the Cosmic-Ray Spectrum ?*, Physical Review Letters, vol. 16, pp 748-750 (1966) 1
- [3] G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min, *Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays*, Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, vol. 4, pp 78 (1966) 1