

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

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

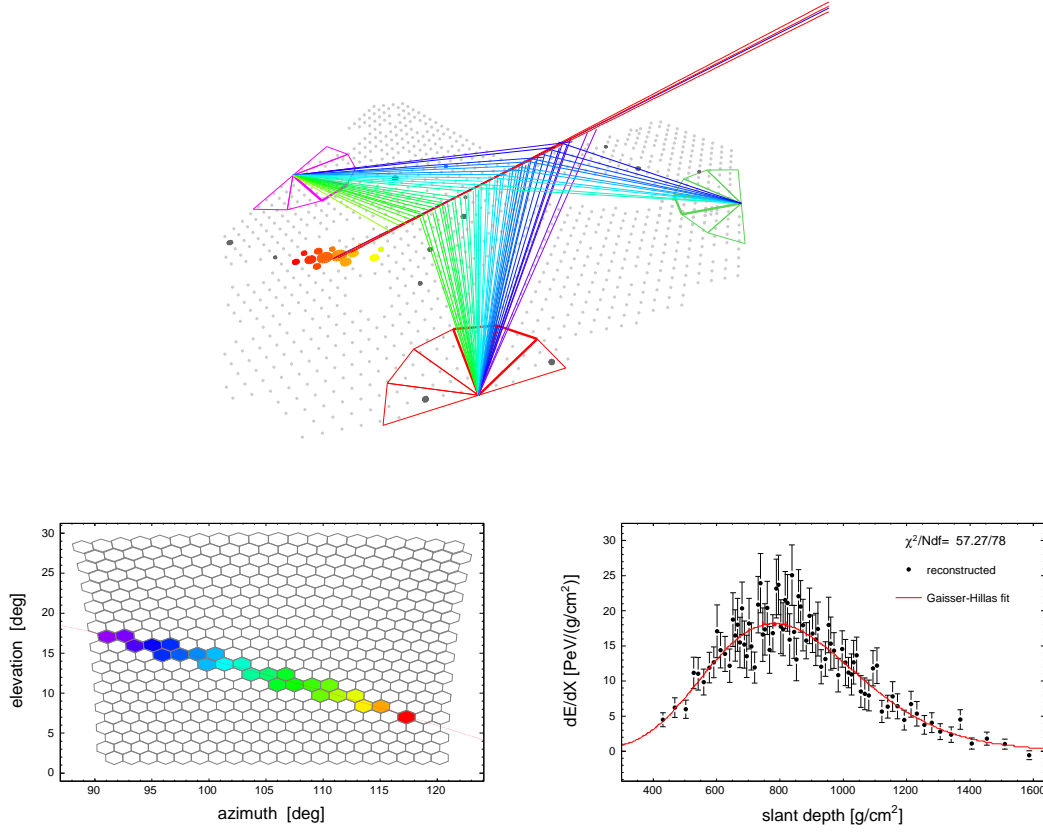


Figure 4.1 -- Vue 3D d'un événement hybride observé par l'Observatoire Pierre Auger (figure du haut). Réponse d'une caméra d'un détecteur de fluorescence (figure de gauche) et profil longitudinal de la gerbe atmosphérique (figure de droite).

de rayons cosmiques jamais construit.

4.1 Présentation du projet

Le but de ce projet est de simuler la réponse du détecteur de fluorescence lors du passage d'une gerbe atmosphérique. Le rayonnement de fluorescence est consécutif à l'interaction entre les particules chargées de la gerbe e^-/e^+ et l'azote présent dans l'atmosphère : le rayonnement UV (300-400 nm) résulte de la désexcitation des atomes d'azote.

Chaque détecteur de fluorescence est composé de 6 caméras comprenant 20×22 pixels (cf. Figure. 4.1). À chaque pixel correspond :

- deux angles (θ_i, ϕ_i) où θ_i correspond à l'élévation du pixel (i, j) et où ϕ_i est l'angle azimuthal,
- un signal dont la valeur sera vraie ou fausse selon que le pixel ait été touché ou non,
- un temps $t_{i,j}$ d'arrivée du signal dans le pixel (i, j) .

La caméra couvre un champ de 30° par 33° . Le pixel (i, j) pointe ainsi dans la direction :

$$\theta_i = 1.5 \times j \quad \text{et} \quad \phi_j = 60 + 1.5 \times (20 - i)$$

où $i \in [1, 20]$ et $j \in [1, 22]$.

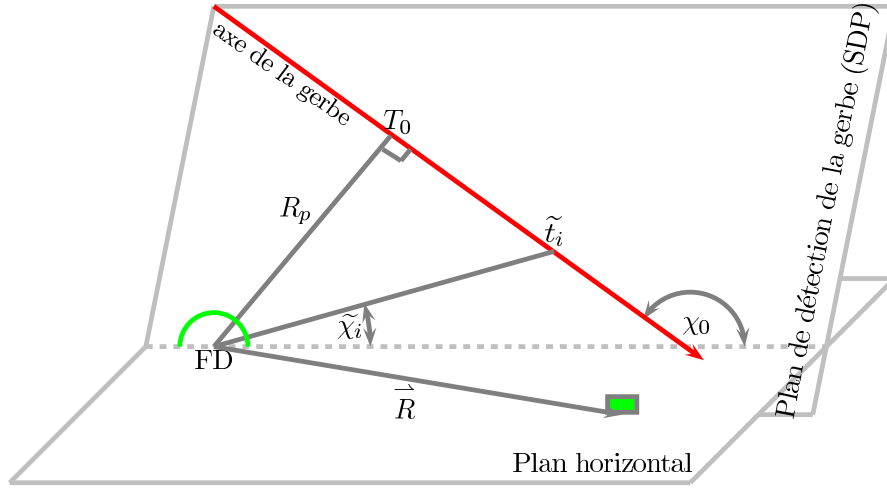


Figure 4.2 -- Paramètres géométriques de la gerbe pour la reconstruction hybride.

4.1.1 Génération et simulation d'événement

Un événement est caractérisé par l'énergie E de la particule primaire et sa direction (θ_{SDP} , ϕ_{SDP}). Le plan de détection de la gerbe correspond au plan contenant l'axe de la gerbe et passant par le détecteur de fluorescence (cf. Figure. 4.2). La distance entre le détecteur et l'axe de la gerbe est alors notée R_p tandis que χ_0 est l'angle entre le sol et la direction de la gerbe. La génération des événements consiste à tirer aléatoirement des valeurs pour les variables précédentes : R_p sera compris entre 8 et 12 km, θ_{SDP} sera tiré uniformément entre 90 et 100 degrés et ϕ_{SDP} entre 60 et 90 degrés. L'angle χ_0 variera entre 80 et 100 degrés.

Étant donné les paramètres simulés, il s'agit de simuler la réponse d'une caméra au passage de cette gerbe. L'ensemble des pixels touchés vérifie l'équation suivante :

$$\theta_i = \frac{\phi_j - \phi_{\text{SDP}}}{\tan \theta_{\text{SDP}}} \quad (4.1)$$

et le temps d'arrivée est donné par :

$$t_{(i,j)} = -\frac{R_p}{c} \times (\tan(\pi/2 - \chi_0) - \tan(\pi - \chi_0 - \theta_i)) \quad (4.2)$$

4.1.2 Reconstruction des événements

À partir des informations issues de la caméra, on reconstruira les valeurs R_p , θ_{SDP} , ϕ_{SDP} et χ_0 . Les valeurs de θ_{SDP} et ϕ_{SDP} se déduisent de l'équation 4.1 en ajustant les données (θ_i, ϕ_j) . De même, les paramètres R_p et χ_0 sont obtenus à partir du temps de chacun des pixels (i, j) . On comparera ces données reconstruites aux valeurs simulées.

Dans un second temps, on pourra simuler le bruit de la caméra à savoir le fait que certains pixels déclenchent sans rapport avec le passage d'une gerbe atmosphérique. La position de ces pixels est aléatoire et le temps sera compris dans une fenêtre de $5 \mu\text{s}$ entre le premier et le dernier pixel touché. On ajoutera donc ce bruit de pixel (entre 1 et 10 pixels bruyants) et on évaluera l'impact sur la qualité de la reconstruction. On pourra enfin envisager de supprimer ce bruit en fonction de critères de cohérence spatiale et/ou temporelle.

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