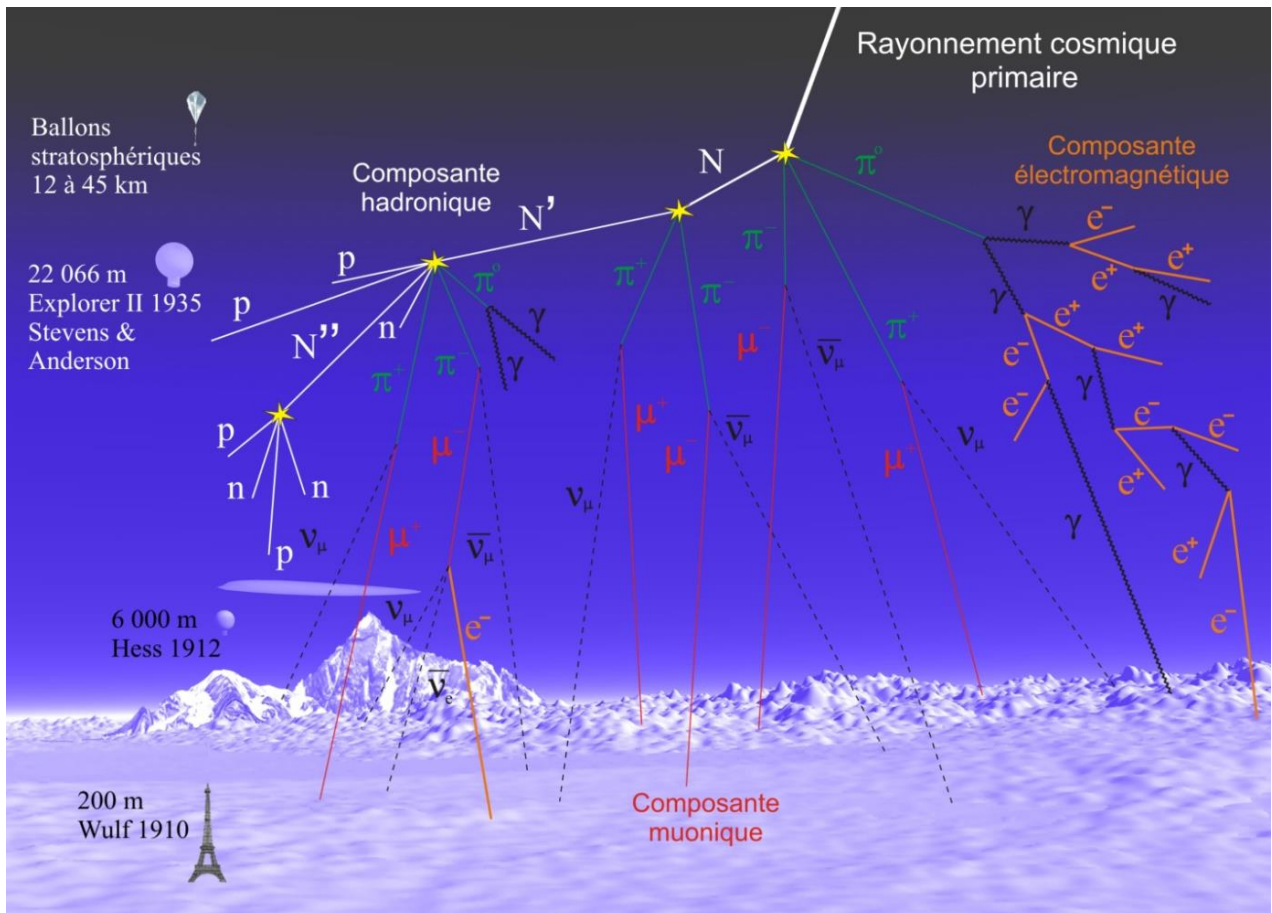


Les rayons cosmiques

Les rayons cosmiques sont composés de particules énergétiques provenant de l'espace produisant des particules dites secondaires à leur entrée dans l'atmosphère : elles forment alors une gerbe de particules.

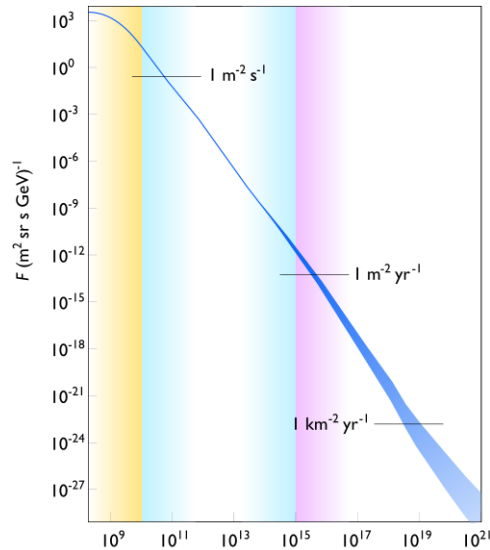


Formation de gerbe de particules par interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère.
Crédit : C. Lagoute

Composition :

A leur arrivée dans la haute atmosphère, les rayons cosmiques (formant le rayonnement dit primaire) peuvent provenir de très loin (au-delà de notre galaxie) et sont donc forcément composés de particules stables. La composition est la suivante :

- principalement des protons : 87%
- des noyaux atomiques : 12% (essentiellement de l'hélium)
- des électrons : 1%



Spectre en énergie des rayons cosmiques et flux correspondant. Crédit : wikipedia.

Provenance :

Le large spectre en énergie observé (voir figure ci-dessus) est expliqué en partie par les origines diverses des rayonnements cosmiques :

- solaires : liés aux éruptions solaires (10 à 100 MeV) permettant l'accélération de particules (protons et noyaux) à une vitesse proche de celle de la lumière ;
- accélérations par des champs magnétiques résultant d'explosions de supernovae (100 MeV jusqu'à 10 GeV) ;
- quasars, AGN¹ (noyaux de galaxies particulièrement lumineux) peut aller jusqu'à 10¹¹ GeV.

Remarques :

- le flux est d'autant plus faible que les particules sont énergétiques (voir figure ci-dessus) ;
- les vents solaires ont tendance à nous protéger des rayonnements cosmiques de basse énergie en raison du champ magnétique qu'ils créent ;
- il est admis que la majorité des rayons cosmiques d'énergie allant jusqu'à 10⁹ GeV proviennent de notre galaxie. Au-delà de cette valeur, l'isotropie du rayonnement² laisse supposer une origine extra galactique.

Interaction avec l'atmosphère

En entrant dans l'atmosphère le rayonnement primaire interagit avec les électrons et les noyaux des atomes ainsi qu'avec les molécules composant l'air. La composition du rayonnement cosmique change lors de sa propagation dans l'atmosphère : il y a développement d'une gerbe de particules.

Chaque particule du rayonnement primaire interagit suivant un mécanisme différent avec les particules de l'atmosphère, donc l'atténuation de leur flux jusqu'au sol dépend des particules.

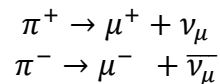
¹ Active Galactic Nucleus.

² Contrairement aux rayonnements qui proviennent de notre galaxie de directions particulières, liées à notre position excentrée dans la Voie lactée.

- *Protons et noyaux*

Par collision avec les noyaux de l'atmosphère, les protons et autres noyaux composant les rayons cosmiques produisent par interaction forte des mésons* (essentiellement des pions : π^0 , π^+ et π^-). Ces particules forment la partie dite hadronique* du rayonnement cosmique. Si les mésons créés possèdent une énergie suffisante, de nouvelles collisions conduiront à la production de nouveaux mésons. Sinon les mésons produits se désintègrent :

- les pions neutres se désintègrent immédiatement ($\tau \sim 10^{-16}$ s) en deux photons*. Ceux-ci contribuent alors à la partie électromagnétique de la gerbe.
- les pions chargés, de durée de vie plus longue ($\tau \sim 2,6 \cdot 10^{-8}$ s), se désintègrent en muon et neutrino* suivant les réactions :



Ces muons sont détectables au sol.

- *Electrons et photons*

Les électrons³ et les photons provenant du rayonnement primaire ou de la désintégration des particules forment la partie électromagnétique du rayonnement cosmique.

- Les électrons perdent de l'énergie lors leur traversée de l'atmosphère par rayonnement de freinage*. Celui-ci est lié au passage d'une particule chargée près du champ coulombien d'un atome : l'accélération de celle-ci est alors modifiée, entraînant un rayonnement électromagnétique (production d'un photon suivant : $e^- \rightarrow \gamma + e^-$) et une perte d'énergie.
- Les photons créent des paires électrons-positrons qui perdront à leur tour de l'énergie par rayonnement de freinage.

La partie électromagnétique interagit avec l'azote de l'air : celui-ci devient fluorescent au passage du rayonnement cosmique⁴.

Composition au niveau du sol

En raison des interactions et des durées de vie des particules, au niveau du sol, il ne reste quasiment que des muons (75%) d'énergie moyenne d'environ quelques GeV et des neutrinos (peu interactifs). Les muons perdent de l'énergie à un taux de 2 MeV par g/cm^2 ⁵ et la profondeur de l'atmosphère correspond à environ 1000 g/cm^2 . Les muons perdent donc environ 2 GeV avant d'atteindre le sol. Cette perte d'énergie se fait par rayonnement de freinage. Le flux de muon au niveau de la mer est d'environ 1 muon par cm^2 par minute (ce qui conduit à ce que notre corps soit traversé par 100 000 muons par heure).

Effet relativiste

Compte tenu de la durée de vie moyenne des muons ($\tau \sim 2,2 \cdot 10^{-6}$ s), si ceux-ci ont une vitesse proche de celle de la lumière, ils devraient parcourir une distance : $d = v \cdot t = 660$ m.

³ Et positrons.

⁴ Cette propriété est utilisée pour étudier les propriétés du rayonnement cosmique : forme, direction et énergie (notamment par le détecteur Auger).

⁵ Cette unité est utilisée pour traduire la surface et le type de matériau traversé.

La dilatation des durées liée à la relativité restreinte justifie le fait que l'on observe des muons au sol, formés au niveau de la stratosphère (entre 10 à 50 km d'altitude).

Historique

Un rayonnement d'origine inconnue provoquant un bruit parasite affectant tous les détecteurs d'ionisation, le père Théodore WULF réalisa des mesures en haut de la Tour Eiffel en 1907 afin d'identifier leur origine. Il remarqua que le rayonnement terrestre se trouvait bien diminué mais que le taux n'était pas nul : un rayonnement inconnu devait provenir de l'espace. Pour tester cette hypothèse, Viktor F. HESS effectua des mesures en ballon : en 1912, il montra que le taux de rayonnements inconnus augmentait fortement avec l'altitude. Il partagea le prix Nobel de physique en 1936 avec Carl ANDERSON qui découvrit le positron, première particule d'antimatière grâce à une chambre de WILSON (chambre à brouillard) traversée par le rayonnement cosmique. L'étude de ce dernier a également permis la découverte du muon (1936), du pion (1947) et du kaon* (1947). L'étude de la physique des particules fut après principalement menée à l'aide d'accélérateurs de particules. Le rayonnement cosmique est également étudié comme par l'Observatoire Pierre AUGER (Argentine) afin de déterminer la provenance des rayons cosmiques les plus énergétiques.

Bibliographie :

- *Revue Élémentaire*, n°3, IN2P3 : <http://elementaire.web.lal.in2p3.fr>
- *Quand le ciel nous bombarde*, M. Crozon
- *Réalisation d'un détecteur de muons*, C. Lagoute : <http://ch.lagoute.free.fr/CosmoDCL/>
- *Cosmic Rays*, K. Nakamura et al. : http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/contents_sports.html
- *Cosmic rays at earth*, P. K. F. Grieder, édition Elsevier