EXERCICE I : Le muon, explorateur de volcan (6 points)

Les muons, produits à haute altitude lors d'interactions entre les rayons cosmiques et les noyaux atomiques présents dans l'atmosphère terrestre, traversent cette dernière à une vitesse approchant la célérité de la lumière.
Certains des muons arrivant au sol possèdent une énergie suffisante leur permettant de traverser plusieurs centaines de mètres de roche avant de se désintégrer. Ils sont utilisés pour radiographier les volcans.



Télescope permettant la détection des muons, placé au bas de la Soufrière, volcan actif de Guadeloupe.
D'après Reflets de la physique, Janvier 2013

Données :

- célérité de la lumière dans le vide c = 299 792 458 m.s^{-1} ;

- 1 eV = 1,60 × 10^{-19} J ;

- facteur de Lorentz : $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ où v est la vitesse de la particule dans le référentiel du laboratoire ;

- la durée de vie ΔT d'une particule animée d'une vitesse v, mesurée dans le référentiel du laboratoire, est liée à sa durée de vie propre ΔT_0 par l'égalité :

$$\Delta T = \gamma \, \Delta T_0 \ ;$$

- énergie d'une particule de masse m en mouvement : $E = \gamma \, mc^2$;

- on supposera que dans les conditions de l'expérience une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique est soumise à une force magnétique d'intensité proportionnelle à la vitesse de la particule, à la valeur absolue de sa charge et au champ magnétique ; cette force est indépendante de la masse de la particule ;

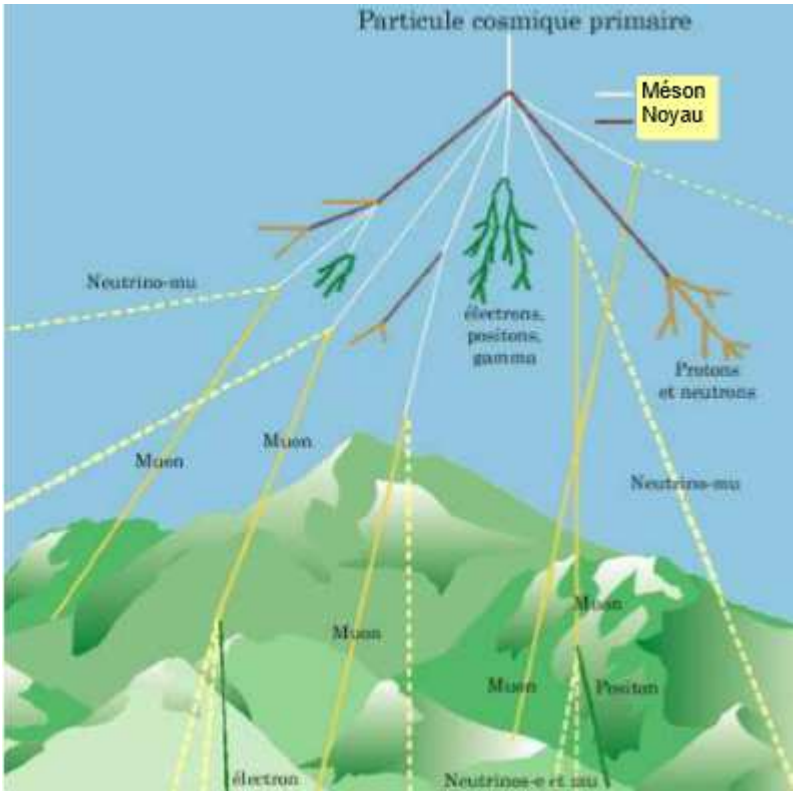
- masse du muon : m_μ = 105,66 MeV.c^{-2} ;

- intensité du champ de pesanteur : g = 10 N.kg^{-1}.

DOCUMENTS UTILES À LA RÉSOLUTION

Les muons

Découverts en 1936, les muons sont produits à grande hauteur dans l'atmosphère (5 à 30 km) à partir du rayonnement cosmique primaire.



Site laradioactivite.com

Le muon porte une charge électrique négative. Dans le même champ magnétique et à vitesse égale, sa trajectoire est moins incurvée que celle d'un électron mais plus incurvée que celle d'un proton. En admettant que sa charge électrique négative est égale à celle de l'électron, on déduit que le muon a une masse de valeur comprise entre celle de l'électron et celle du proton.

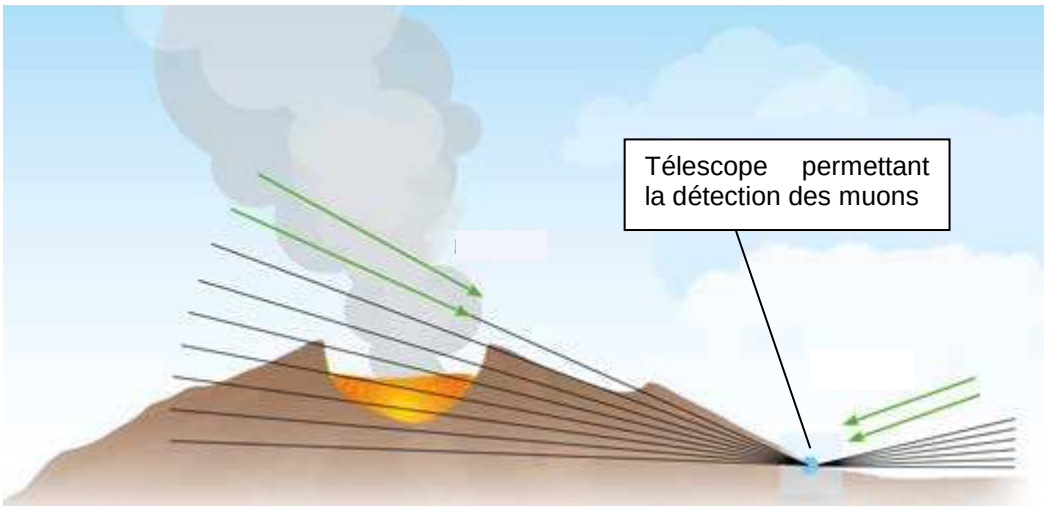
Un muon créé à une hauteur de 20 km doit mettre environ 67 µs pour arriver au sol. Mais cette durée représente 30 fois la durée de vie du muon...

En 1976, des expériences réalisées au CERN à Genève ont permis de produire un faisceau de muons de vitesse 0,9994*c*. Injectés dans un grand anneau de stockage où ils sont confinés par des aimants puissants, ces muons circulent jusqu'à leur désintégration. Bien qu'un muon ne puisse survivre plus de 14 ou 15 tours selon la mécanique newtonienne, la plupart d'entre eux font plus de 400 tours. Les détecteurs d'électrons entourant l'anneau ont montré que ces muons ont un temps de vie environ égal à 30 fois leur temps de vie au repos.

D'après « Ondes, optique et physique moderne », Hecht

Principe de la radiographie muonique

La radiographie muonique utilise les muons quasi-horizontaux : ceux-ci sont absorbés par les roches à travers lesquelles ils sont passés. Plus les roches sont denses, plus les muons sont absorbés.



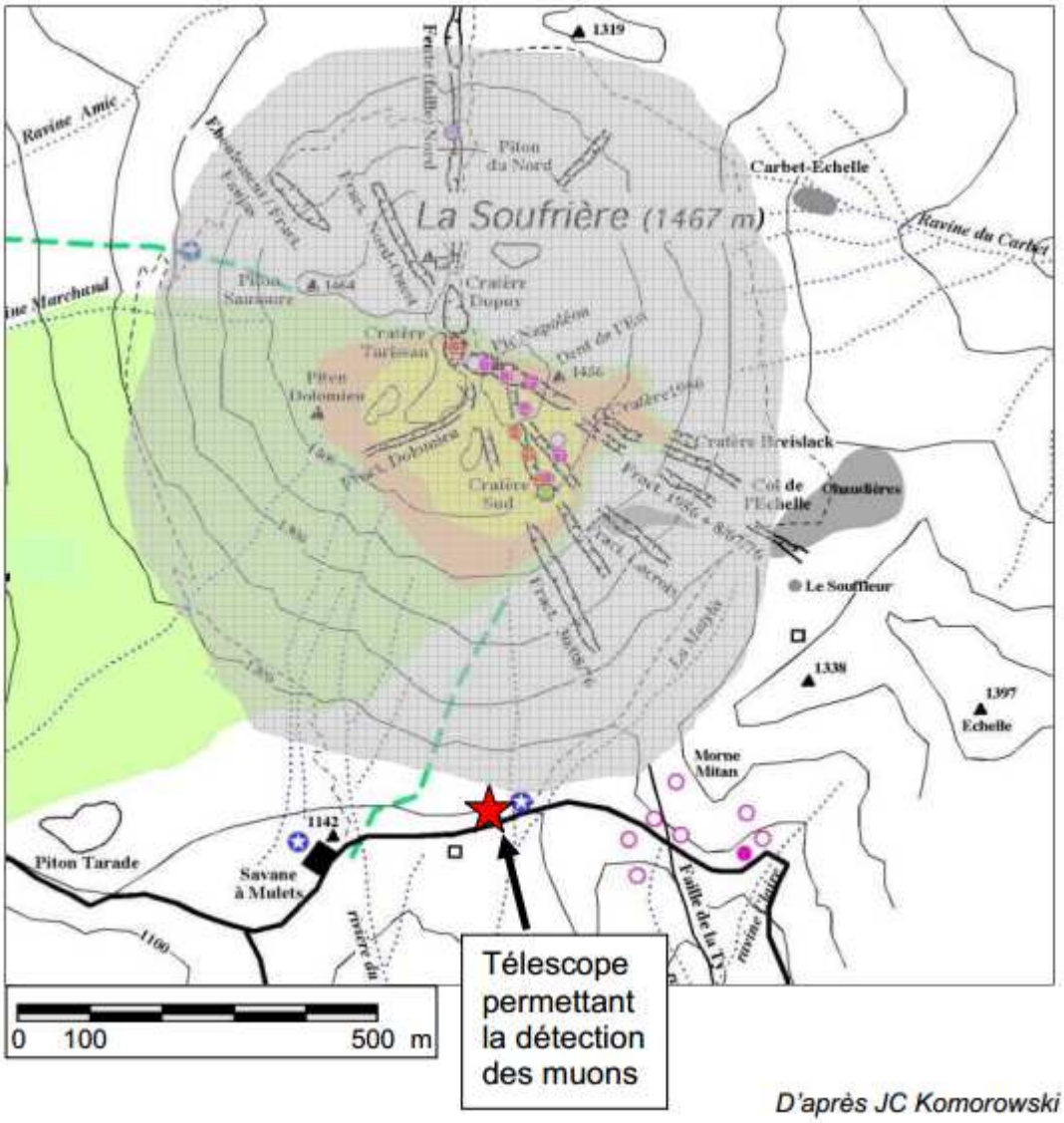
D'après Science in School, décembre 2013

Au niveau du sol, le flux moyen de muons est d'environ 1 muon par cm^2 et par minute. Chaque muon perd en moyenne 2 MeV par cm de roche traversée. Les muons ordinaires ont une énergie moyenne de 4 GeV. Cependant, certains muons possèdent une énergie très importante, supérieure à 1000 GeV, leur permettant de traverser plusieurs centaines de mètres de roche avant de se désintégrer. Ce sont ces particules qui sont utilisées pour radiographier les volcans. Des télescopes comportant des matrices de détecteurs sont placés en contrebas du volcan pour compter et déterminer les trajectoires des muons possédant suffisamment d'énergie pour traverser le massif rocheux. En comparant le flux de muons ayant traversé le volcan au flux mesuré à ciel ouvert, il est possible de connaître la quantité de matière que les muons ont rencontrée pendant leur traversée.

D'après Reflets de la physique, article 32, Janvier 2013

Carte du volcan de la Soufrière

On peut considérer que la surface S grisée, proche de celle d'un disque de diamètre D, correspond à la surface de la Soufrière exposée au flux de muons.



1. Les muons créés en haute atmosphère

1.1. Dilatation des durées

1.1.1. Retrouver à l'aide d'un calcul l'estimation faite dans les documents de la valeur du temps de parcours d'un muon créé à une altitude de 20 km pour arriver jusqu'au sol.

1.1.2. Albert Einstein publie en 1905 une nouvelle théorie intitulée « la relativité restreinte » qui remet en cause la mécanique classique.
Énoncer le postulat d'Einstein relatif à la vitesse de la lumière.

1.1.3. Expliquer sans calcul en quoi la détection d'un nombre important de muons au niveau de la surface terrestre constitue une preuve expérimentale de la « dilatation » des durées.

1.2. Pourquoi peut-on dire que le muon, le proton et l'électron sont soumis à une force magnétique de même intensité lorsqu'ils pénètrent à la même vitesse dans un champ magnétique ?
Justifier pourquoi la différence de courbure alors observée permet d'affirmer que le muon a une masse intermédiaire entre celle du proton et celle de l'électron.

2. Les muons au CERN

2.1. Justifier à l'aide d'un calcul l'affirmation : « Ces muons ont un temps de vie environ égal à 30 fois leur temps de vie au repos ».

2.2. Vérifier alors la cohérence entre les valeurs « 14 ou 15 tours » et « 400 tours » données dans les documents.

3. Les muons pour la tomographie d'un volcan

La tomographie est une technique d'imagerie permettant de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures.

3.1. Expliquer pourquoi un muon ordinaire d'énergie moyenne de 4 GeV ne peut pas être utilisé pour radiographier la Soufrière.

3.2. Déterminer l'ordre de grandeur de l'énergie apportée pendant une minute par le flux de muons ordinaires sur la surface de la Soufrière. Comparer la valeur obtenue à l'ordre de grandeur d'une énergie de votre choix.

3.3. Déterminer la valeur du rapport v/c où v est la vitesse d'un muon ordinaire d'énergie 4 GeV. En déduire pourquoi les muons utilisés pour la radiographie volcanique sont qualifiés d' « ultra-relativistes ».