

# ARTICLE DE FOND

## DÉSINTÉGRATION DU MUON: UNE HORLOGE RELATIVISTE

Pierre Magnien

*Parmi les compétences exigibles contenues dans le prochain programme de physique de terminale on lit : « Définir la notion de temps propre. Exploiter la relation entre la durée propre et la durée mesurée » et, parmi les situations concrètes suggérées dans la présentation générale : « désintégration des muons dans l'atmosphère ». L'article qui suit devrait favoriser l'étude de cette question. L'auteur suggère par ailleurs d'ouvrir une discussion sur la liste de diffusion du CLEA.*

### Introduction

L'un des résultats le plus surprenant de la relativité restreinte est celui du ralentissement des horloges pour un observateur dont le référentiel est animé, par rapport à celui où ces dernières sont au repos, d'une vitesse non négligeable devant celle de la lumière. S'il n'existe pas dans la vie courante d'objet avec lesquels on pourrait vérifier cette affirmation, il n'en est pas de même dans le monde subatomique. En effet de nombreuses particules découvertes dans les décennies antérieures ne sont pas stables et se désintègrent en une fraction de seconde. Une population suffisamment importante va alors constituer une horloge tout à fait convenable.

Pour étudier ces objets et leurs propriétés, les expériences sur les rayons cosmiques constituent un moyen particulièrement intéressant pour mettre en évidence les propriétés fondamentales d'un tel rayonnement. De plus, certaines d'entre elles peuvent être reproduites avec un simple système de détection fournissant des résultats de qualité pour des activités d'enseignement.

Comme ces particules sont, le plus souvent, animées de très grandes vitesses, ces travaux permettent également de tester les affirmations de la relativité.

Parmi celles-ci, se sont les muons<sup>20</sup>, notés  $\mu$ , qui conviennent le mieux à nos objectifs et ceci pour plusieurs raisons :

- ils sont chargés et, de ce fait, plus faciles à détecter que des particules neutres ;
- leur durée de vie est relativement importante – plusieurs microsecondes- et donc assez facile à mesurer ;

<sup>20</sup> Le muon appartient, comme l'électron, à la famille des leptons. Il n'est donc sensible qu'à l'interaction électromagnétique et à l'interaction faible. Cette dernière ne joue aucun rôle ici.

- leur masse n'est pas très élevée – 207 fois celle de l'électron – ce qui leur permet d'avoir un facteur  $\gamma$  important même si leur énergie cinétique est relativement faible.

Les muons sont des sous-produits abondants des interactions entre les rayons cosmiques (voir ci dessous) et les atomes et molécules constituant notre atmosphère

Le muon étant un lepton, il est insensible aux interactions fortes et son parcours dans la matière est déterminé par une interaction électromagnétique avec les composants des atomes du milieu traversé.

### Production des muons

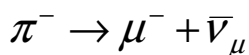
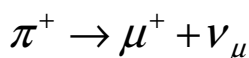
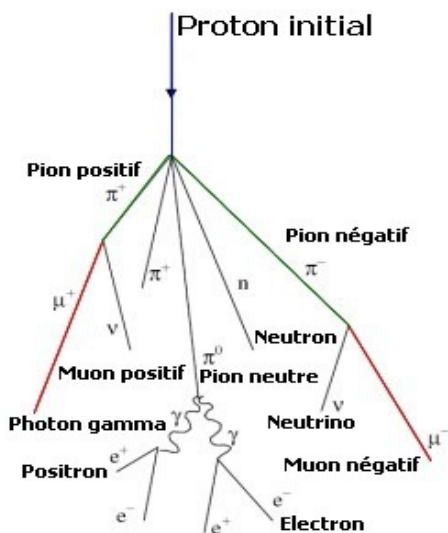
Les rayons cosmiques, formés essentiellement de **protons**, bombardent en permanence les hautes couches de l'atmosphère terrestre. Les interactions entre ces particules et les noyaux des atomes formant les molécules de ces couches supérieures produisent des gerbes d'objets subatomiques parmi lesquels on trouve des protons, des neutrons, des pions, des kaons, des photons, des électrons et des positrons. Intéressons nous en particulier aux pions qui existent sous les trois formes  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  et  $\pi^0$ .

Les deux premiers se désintègrent très rapidement avec une durée de vie moyenne<sup>21</sup> de  $2,6 \cdot 10^{-8}$  s via l'interaction faible et le font en produisant un muon et deux neutrinos selon les réactions<sup>22</sup> ci-dessous.

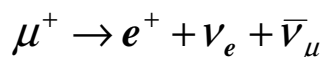
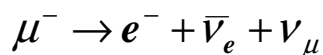
Les particules  $\nu_\mu$  et  $\bar{\nu}_\mu$  sont des neutrinos et antineutrinos muoniques. Ces muons se déplacent avec une vitesse proche de celle de la lumière dans le vide, notée par la suite  $c$ .

<sup>21</sup> Sans indication particulière, il s'agit ici de la durée de vie dans le référentiel où la particule est au repos.

<sup>22</sup> Dans 0,0123 % des cas, la désintégration (toujours via l'interaction faible) donne un positron ou un électron et un neutrino électronique  $\nu_e$



Cependant ce sont également des particules instables qui se désintègrent selon les réactions suivantes :



Les particules  $\nu_e$  et  $\bar{\nu}_e$  sont des neutrinos et antineutrinos électroniques.

Cette désintégration s'effectue avec une durée de vie<sup>23</sup> moyenne de 2,2  $\mu\text{s}$ . Même avec une vitesse presque aussi élevée que 300 000 km/s – donc 300 m/ $\mu\text{s}$  – ils devraient parcourir, en moyenne, une distance un peu supérieure à 600 m après leur création. Or beaucoup d'entre eux traversent toute l'atmosphère et parviennent jusqu'au niveau de la mer lieu où elles représentent les particules chargées, produites dans la haute atmosphère, les plus nombreuses.

Les muons sont en général créés à des altitudes de l'ordre de 30 km. Un muon se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière devrait mettre environ 100  $\mu\text{s}$  pour atteindre le niveau de la mer. Mais le muon, en moyenne, ne vit que quelques  $\mu\text{s}$ ,

<sup>23</sup> La loi de désintégration est de la forme  $N = N_0 \cdot e^{-t/\tau}$  avec  $N$ , nombre de particules à un instant  $t$  quelconque,  $N_0$ , nombre de particules à l'instant  $t = 0$ ,  $\tau$  constante de temps de désintégration ou durée de vie moyenne qui, pour le muon, vaut 2,2  $\mu\text{s}$ . Son inverse  $\lambda = 1/\tau$ , appelé taux de désintégration, permet de représenter, par le terme  $e^{\lambda t}$ , la probabilité pour un noyau de se désintégrer au bout d'un temps  $t$  et ne dépend que de la nature de ce noyau. La demi - durée de vie ou demi - vie ou période  $T$  est égale à  $\tau \cdot \ln 2 = 0,69\tau$  donc, ici, 1,56  $\mu\text{s}$ . C'est la durée au bout de laquelle une population de particules instables est divisée par deux.

durée plusieurs dizaines de fois plus petite que le temps nécessaire pour atteindre le sol. Alors, comment ces particules font-elles pour parvenir jusqu'à une altitude voisine zéro ?

## Quelques rappels utiles pour comprendre l'expérience

### La désintégration des particules instables

Rappelons quelques propriétés générales, mais importantes, de la désintégration des particules instables. Le processus de désintégration est intrinsèquement aléatoire : nous ne pouvons pas prédire la durée de vie d'un muon donné. La probabilité qu'à un muon de se désintégrer à un moment donné est indépendante de l'instant où il a été créé et ceci quel que soit ce qui s'est passé pour lui précédemment. Autrement dit, un muon pris individuellement ne « vieillit » pas, seul un échantillon suffisamment important « vieillit ». L'unique grandeur constante que nous pouvons déterminer est la durée de vie moyenne du muon,  $\tau$ , qui est la moyenne calculée à partir des diverses durées de vie de nombreux muons pris dans un grand échantillon. On définit alors le taux de décroissance  $\lambda$  comme l'inverse de  $\tau$  et la probabilité qu'un muon particulier se désintègre au bout d'un temps  $t$  est donné par :

$$\lambda = 1/\tau \quad \text{et} \quad P(t) = e^{-t/\tau}$$

### La dilatation du temps en relativité restreinte

Rappelons ensuite ce qu'est le phénomène de dilatation du temps en relativité restreinte. Cette dernière nous apprend que l'intervalle de temps  $\Delta t_0$  mesuré dans le référentiel propre ( $\mathbf{R}$ ) de la particule – c'est à dire celui dans lequel elle est au repos – est plus court que n'importe quel autre intervalle correspondant  $\Delta t'$  mesuré dans un autre référentiel ( $\mathbf{R}'$ ) animé, par rapport à ( $\mathbf{R}$ ), d'un mouvement uniforme à la vitesse  $\mathbf{V}$ . La relation entre les deux est :

$$\Delta t' = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma \cdot \Delta t_0 \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{V}{c}$$

Le facteur de dilatation du temps  $\gamma$ , toujours supérieur à un, obéit à l'expression suivante :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Il est important de constater ici que  $\Delta t_0$  est une quantité indépendante de l'observateur. Tout observateur, indépendamment de son

mouvement par rapport à la particule, peut déterminer l'intervalle de temps propre  $\Delta t_0$  de cette dernière à partir de la détermination de l'intervalle de temps correspondant,  $\Delta t'$ , dans son propre référentiel.

Le résultat obtenu sera identique pour tous les observateurs s'ils ont choisi les mêmes événements de référence. Par exemple, dans le cas qui nous intéresse, l'événement  $E_1$  sera la détection du muon et l'événement  $E_2$  sa désintégration. On aura alors :

$$\Delta t_0 = t_{0(E_2)} - t_{0(E_1)}$$

$$\Delta t' = t'_{(E_2)} - t'_{(E_1)}$$

Le temps propre est donc une propriété intrinsèque de la particule. Il est déterminé dans le repère où cette dernière et au repos, c'est à dire que les deux événements  $E_1$  et  $E_2$  ont lieu au même lieu et la mesure de  $t_{0(E_1)}$  et de  $t_{0(E_2)}$  ne nécessite qu'une seule horloge.

Remarquons, pour terminer, que cette dilatation du temps est une conséquence directe de l'invariance de la vitesse de la lumière, quel que soit le référentiel dans lequel elle est mesurée.

### Interaction des muons avec la matière traversée

Comme toutes les particules chargées, les muons perdent de l'énergie essentiellement par ionisation des atomes avec lesquels ils sont en interaction. Ils peuvent voyager sur de très grandes distances et atteindre le sol en grand nombre.

Cette perte d'énergie se fait à un taux pratiquement constant. Il est, pour l'air atmosphérique, de l'ordre de  $2 \text{ MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ . Comme la masse unitaire d'une colonne atmosphérique est d'environ  $1000 \text{ g/cm}^2$ , les muons perdent  $2 \text{ GeV}$  par ionisation avant d'atteindre le sol. L'énergie moyenne des muons au niveau de la mer étant de  $4 \text{ GeV}$ , l'énergie moyenne disponible lors de leur formation est donc d'environ  $6 \text{ GeV}$ . Cette dernière est essentiellement sous forme cinétique puisque  $E_0 \ll 6 \text{ GeV}$ . Les muons sélectionnés ayant une énergie initiale de l'ordre de  $1 \text{ GeV}$ , leur population est faible par rapport à l'ensemble des muons se formant en haute altitude (moins de 1%).

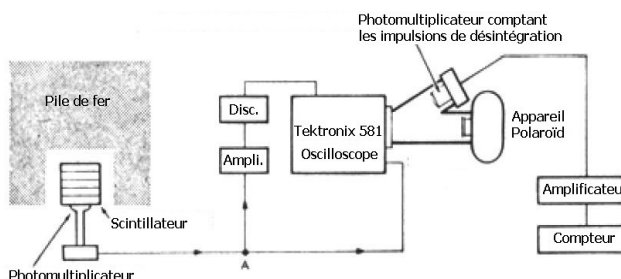
### Principe de la méthode

En 1962 deux physiciens américains du MIT, David H. Frisch et James H. Smith, décidèrent de refaire, en la simplifiant, l'expérience<sup>24</sup> qu'un de leur

collègue, Bruno Rossi, avait réalisée en 1940. Il s'agit pour eux de vérifier les conséquences de la relativité restreinte en s'appuyant sur des mesures concernant les muons formés dans la haute atmosphère terrestre par les rayons cosmiques qui arrivent en une « pluie » incessante depuis l'espace galactique et intergalactique. Ils vont ainsi déterminer les durées de vie individuelles des muons et le nombre de particules se désintégrant dans le détecteur.

Ils réalisent au sommet du Mont Washington (1910m), dans le New Hampshire, la mesure du nombre de désintégration de muons cosmiques pendant une heure. Pour chaque muon stoppé dans le détecteur, ils en mesurent également la durée de vie propre pour obtenir la distribution sur une heure de tous les muons. Prévoyant de réaliser la même expérience à proximité du niveau de la mer (3 m), ils déterminent, d'après leurs mesures, le nombre de muons survivants après 1907 m de voyage supplémentaire en utilisant les résultats de la mécanique classique. Conduisant cette seconde expérience au MIT, ils constatent qu'ils détectent beaucoup plus de muons que ce qui était prévu ; ceci est alors interprété grâce à la dilatation relativiste des durées dans un repère en mouvement par rapport à l'observateur

### Réalisation de l'expérience



Le schéma suivant, provenant de l'article paru dans l'**AJP**, nous montre la manipulation et le matériel utilisé.<sup>25</sup>

On peut voir l'ensemble de ce matériel dans le film « *Time dilation : an experiment with mu-mesons* » réalisé à cette occasion. Sur la photographie ci-dessous on peut voir :

- une pile de fer, visible au fond, dont on expliquera le rôle un peu plus loin ;
- le détecteur (ici manipulé par le docteur Smith) qui est formé de quatre disques de plastique dopé générant une impulsion lumineuse lorsqu'il

<sup>24</sup> Rossi, B.; Hall, D. B. (1941). "Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum". *Physical Review* **59** (3): 223–228.

<sup>25</sup> AJP (American Journal of Physics) – volume 32 (1963) pages 342-355.

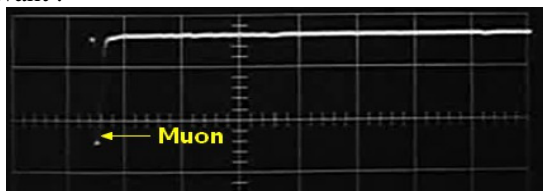
est traversé par une particule. On utilise ici un scintillateur<sup>26</sup> dans lequel le passage d'une particule électrisée produit un flash lumineux lié à l'ionisation du matériau qui le constitue ;

- à droite, l'oscilloscope au premier plan et l'électronique au fond.
- dans le carton, en avant plan, le photomultiplicateur.



L'expérience est conduite selon le protocole suivant. Pour obtenir des résultats significatifs il faut isoler des muons ayant des vitesses très voisines les unes des autres. Les deux physiciens vont donc sélectionner des muons ayant des vitesses comprises entre  $0,9950c$  et  $0,9954c$ , ce qui représente moins de 1% de ceux arrivant au-dessus du sélecteur choisi. Pour cela ils placent le détecteur sous une épaisseur de fer de 76 cm calculée de façon à ce que les muons ayant une vitesse inférieure à  $0,9950c$  s'arrêtent avant le scintillateur et ceux ayant une vitesse supérieure à  $0,9954c$  traversent le scintillateur sans s'arrêter. Au niveau de la mer, la pile de fer sera moins haute pour tenir compte de l'épaisseur atmosphérique supplémentaire.

La lumière émise dans le scintillateur est récupérée par le photomultiplicateur dont l'impulsion de sortie, après amplification et mise en forme, est appliquée, d'une part, sur l'entrée de déclenchement d'un oscilloscope et, d'autre part, sur son entrée verticale. Lorsqu'un muon traverse le dispositif son passage donne lieu à une trace sur l'écran de l'oscilloscope comme celle visible sur le document photographique suivant :

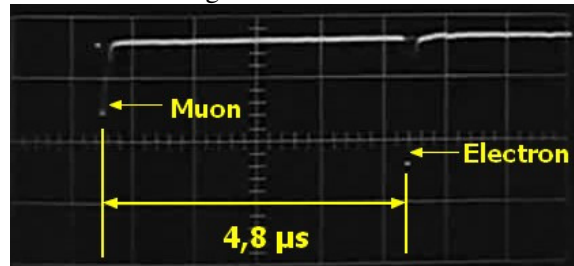


L'impulsion due au flash lumineux provoqué par le passage d'un muon dans le scintillateur apparaît ici. Il n'apparaît pas d'autre impulsion qui serait provoquée

<sup>26</sup> Pour éviter les pertes de photons les disques sont entièrement recouverts par un cylindre en aluminium et, pour se soustraire aux lumières parasites, les expérimentateurs entourent le tout avec une couverture soigneusement refermée à l'aide de ruban adhésif.

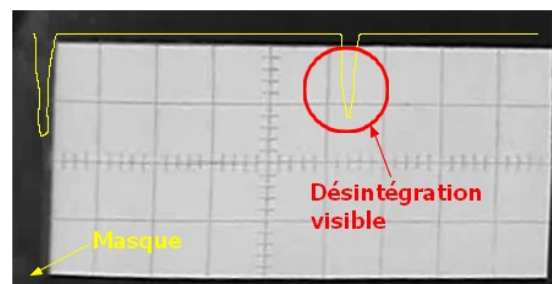
par le flash lié à sa désintégration et à l'émission d'un électron. Ce muon ne s'est donc pas arrêté dans le scintillateur.

Lorsqu'il est suffisamment ralenti – donc sa vitesse à l'entrée dans la pile de fer est à l'intérieur du domaine sélectionné – le muon s'arrête dans le scintillateur et, au bout de quelques microsecondes, se désintègre en émettant un électron, comme le montre cet oscillogramme.

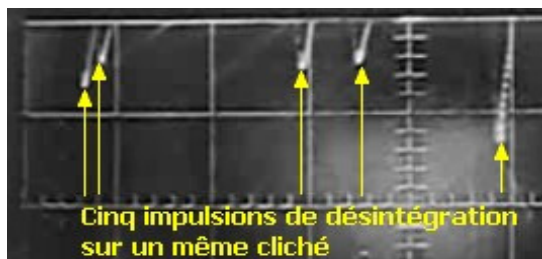


Il s'agit de la désintégration d'un muon, au repos dans le laboratoire,  $4,8 \mu s$  après s'être arrêté dans le scintillateur.

La difficulté suivante à résoudre est due à la nécessité de disposer d'un échantillon suffisamment grand pour lui appliquer une analyse statistique satisfaisante. Pour cela Frisch et Smith vont enregistrer plusieurs séries de mesures durant une heure afin de vérifier que la distribution statistique est reproductible au cours du temps. Pour y parvenir, ils vont réaliser des poses photographiques de l'écran à l'aide d'un appareil Polaroid, chaque cliché enregistrant jusqu'à une vingtaine de désintégrations. Pour éviter que le document ne soit voilé par la trace de balayage et les très nombreuses impulsions de déclenchement qui ne sont pas suivies par une impulsion de désintégration, les deux scientifiques utilisent l'astuce suivante : comme on peut le voir ci dessous, un cache est placé sur l'écran de façon à masquer la trace de balayage et la première impulsion. De cette façon ne restera visible que l'impulsion de désintégration.



On peut maintenant laisser l'appareil photographique en mode pose et enregistrer plusieurs désintégrations sans « griller » l'émulsion. On dispose alors de clichés comme celui présenté ci dessous :



Durant l'heure d'enregistrement photographique les deux physiciens réalisent également un comptage des muons qui se désintègrent dans le scintillateur. Pour cela il place au-dessus de l'appareil Polaroid un photomultiplicateur (voir schéma de la manipulation) qui est dirigé vers l'écran de l'oscilloscope et qui donne une impulsion électrique à chaque flash lumineux de désintégration. Après amplification et mise en forme cette information est envoyée sur un compteur mécanique qui s'incrémente à chaque fois de un.



Au sommet du Mont Washington Frisch et Smith ont donc enregistré au cours de plusieurs séries de mesures :

- la distribution des durées de vie des muons arrêtés dans le scintillateur pendant une heure. Ils obtiennent une série de durées de vie propres individuelles puisque chaque muon est au repos par rapport au référentiel du laboratoire ;

- le nombre de ces muons. Cette information était bien sûr contenue dans le point précédent puisque chaque muon stoppé dans le scintillateur était identifié mais, pour des raisons pédagogiques liées à l'utilisation du film avec des étudiants, ils ont souhaité afficher directement cette valeur.

La manipulation est recommencée à proximité du niveau de la mer, au MIT, à Cambridge, près de Boston dans le Massachusetts. Pour cette seconde expérience, après avoir réduit de 30 cm la hauteur de la pile de fer pour tenir compte du ralentissement des muons dans l'épaisseur d'air traversée entre les 1910 m du Mont Washington et les 3 m du MIT, ils comptent de la même façon que plus haut le nombre de muons « survivants » parvenant au niveau de la mer. Sachant qu'il n'y avait aucune raison pour que la forme de la distribution des durées de vie soit différente, il n'était plus nécessaire de réaliser des clichés dans ces nouvelles circonstances. *Suite CC 139*

## ANNEXE : le muon (autres compléments sur le site)

### Découverte

Le muon a été découvert de façon expérimentale en 1937 par **Carl Anderson** (1905 / 1991) dans le rayonnement cosmique. C'est une des premières particules élémentaires découvertes, après l'électron en 1897 par **Joseph John Thomson** (1856 / 1940), le proton en 1919 par **Ernest Rutherford** (1871 / 1937) et le neutron en 1932 par **James Chadwick** (1891 / 1974). On l'a tout d'abord pris pour le méson  $\pi$  (maintenant appelé pion), à peine plus lourd, et responsable de la force d'interaction forte entre protons et neutrons et dont l'existence avait été prédite en 1935 par **Hideki Yukawa** (1907 / 1981). Cette confusion dura une dizaine d'années mais on s'aperçut progressivement que la particule découverte n'interagissait pas avec les protons et les neutrons. On comprit qu'elle était en fait de nature très différente lorsqu'on découvrit en 1947 la particule prévue par Yukawa et reçut alors le nom de muon.

### Propriétés et formation

Son existence n'avait pas été prédite par la théorie : sa mise en évidence était le fruit du hasard mais il était normal qu'on ait pu le faire bien avant la plupart des autres particules élémentaires instables, car sa durée de vie (de l'ordre de la microseconde) est assez longue pour qu'il parcourt souvent plusieurs centaines de mètres avant de se désintégrer.

Il s'agit en réalité d'une sorte d'électron lourd noté  $\mu^\pm$  et appartenant, dans la terminologie moderne du modèle standard, à la famille des leptons. Ce sont des particules élémentaires de spin demi – entier (fermions) qui sont insensibles à l'interaction forte mais sensibles à l'interaction faible et, pour les leptons chargés, à l'interaction électromagnétique. Comme indiqué dans le tableau ci dessous, il y a douze leptons, correspondant à six particules de matière et six d'antimatière.

Nom	Symbole	Charge (e)	Durée de vie <sup>1</sup> ( $\mu$ s)	Masse
électron/positron	$e^+ / e^-$	-1/+1	stable	0,511 MeV/c <sup>2</sup>
<b>Muon positif/négatif</b>	<b><math>\mu^+ / \mu^-</math></b>	<b>-1/+1</b>	<b>2,2</b>	<b>105,7 MeV/c<sup>2</sup></b>
Tauon positif/négatif	$\tau^+ / \tau^-$	-1/+1	$2,8 \times 10^{-7}$	1777 MeV/c <sup>2</sup>
neutrino/antineutrino électronique	$\nu_e / \bar{\nu}_e$	0	stable	< 2,5 eV/c <sup>2</sup>
neutrino/antineutrino muonique	$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$	0	stable	< 170 keV/c <sup>2</sup>
neutrino/antineutrino taonique	$\nu_\tau / \bar{\nu}_\tau$	0	stable	< 18 MeV/c <sup>2</sup>

[11] Il s'agit ici de la durée de vie dans un repère où la particule est au repos.