ARTICLE DE FOND

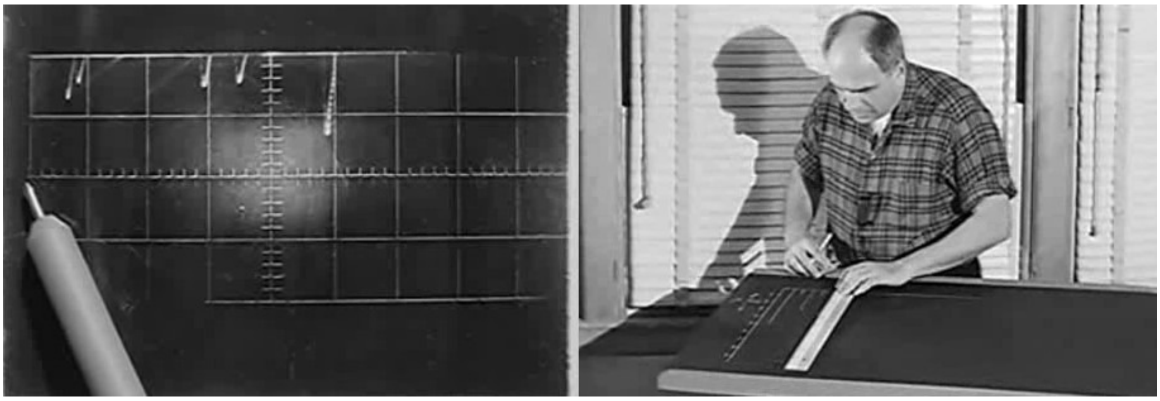
DÉSINTÉGRATION DU MUON: UNE HORLOGE RELATIVISTE

Pierre Magnien

Suite de l'article du CC n°138

Résultats

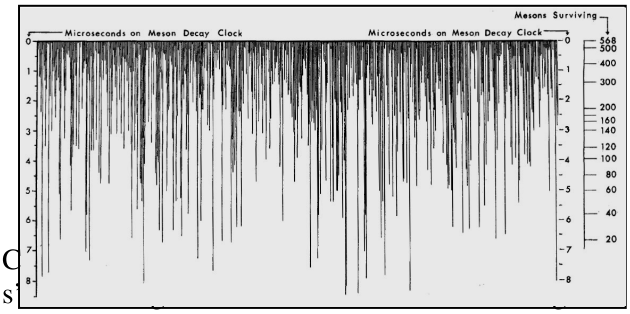
Les enregistrements étant réalisés, ils vont être dépouillés et exploités par les deux expérimentateurs : J. Smith fait la lecture des durées de vie sur les clichés et D. Frisch les reporte sur un graphique.



Plusieurs séries de mesures ont été faites et reportées dans un tableau:

Série de mesures	Sur le Mt Washington	À Cambridge
1	568	412
2	554	403
3	582	436
4	527	395
5	588	393
6	559	…
Taux horaire moyen	563 ± 10	408 ± 9

Pour le film, la représentation graphique au Mont Washington est réalisée en utilisant la première série avec N_w = 568. Le résultat, montré ci-dessous, est extrait de l'article dans l'**AJP** :



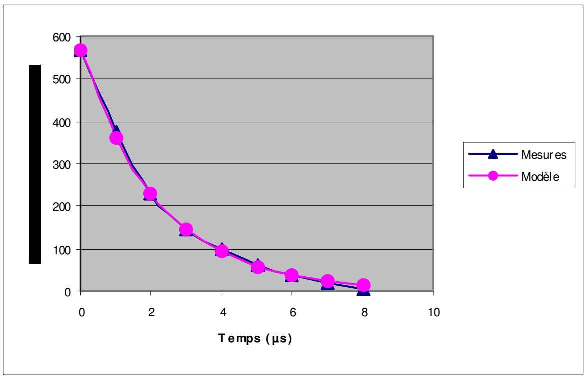
représente la durée de vie propre de la particule. Sur la droite est disposée une échelle donnant la correspondance entre le nombre de muons survivants et le temps écoulé depuis l'arrêt du muon. On constate que cette durée de vie varie dans de larges proportions. On peut rechercher la forme de la distribution en regroupant le nombre de survivants pour chaque tranche de 1 µs.

Temps écoulé (µs)	Nombre de muons survivants	Loi exponentielle
0	568	568
1	373	360
2	229	228
3	145	144
4	99	91
5	62	58
6	36	37
7	17	23
8	6	15

La colonne supplémentaire est celle d'une loi exponentielle pour la distribution dans le temps du nombre de muons survivants. Elle est de la forme :

$$N(t) = 568.e^{-t/\tau} \text{ avec } t = 2{,}2\mu s$$

On peut constater que les mesures et le modèle exponentiel correspondent l'un avec l'autre avec une excellente précision comme le confirme le diagramme ci-dessous.



Cependant, comme on le verra plus loin, il n'est pas nécessaire d'avoir une forme de distribution connue pour obtenir des résultats valables ; il suffit que la loi décrivant le phénomène soit la même au sommet du Mont Washington et au niveau de la mer, ce qui n'est que la conséquence d'une propriété maintes fois vérifiée de la radioactivité : le taux de désintégration d'une particule instable ne dépend que de la nature de cette dernière.

À partir de ces résultats Frisch et Smith vont déterminer combien de muons, sur les 568 recueillis au sommet du Mont Washington, survivront dans le laboratoire du MIT, après 1907 m de descente. Bien sûr ce ne sont pas les mêmes muons puisque, d'une part, ces derniers se sont déjà désintégrés et, d'autre part, on se trouve en un autre lieu et à une autre date. Cependant la méthode est pertinente car :

- Tous les muons sont indiscernables et se désintègrent de la même façon.
- Les variations géographiques du flux de muons sont insignifiantes entre deux lieux aussi proches l'un de l'autre (environ 200 km)
- Les variations temporelles du flux de muons sont négligeables entre deux moments de mesure aussi proches l'un de l'autre (quelques jours)

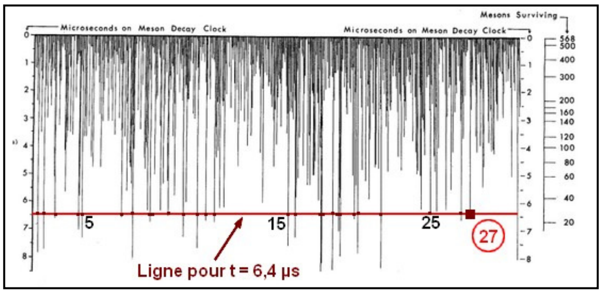
Les muons sélectionnés ayant, à mieux qu'un pour cent près, la vitesse de la lumière, on peut calculer facilement le temps t_{wc} qu'ils mettent pour passer d'une altitude de 1910 m à une altitude de 3 m.

On a, dans le référentiel terrestre :

$$t_{wc} \approx \frac{(1910-3)}{3.10^{8}} = 6{,}4\,\mu s$$

Donc, sur le graphique de la distribution montré plus haut, on repère la ligne horizontale correspondant à un temps de 6,4 µs et on compte, dans la fenêtre de vitesses sélectionnée, combien de lignes verticales sont coupées pour obtenir le nombre de muons survivants au niveau de la mer. Cette méthode est valable quelle que soit la forme de la distribution statistique des durées de vie des muons.

Sur le graphique suivant on peut compter le nombre de survivants au bout de 6,4 µs.

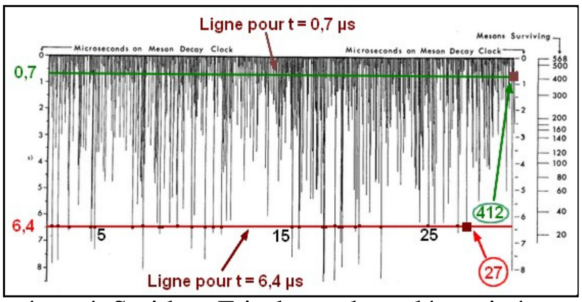


On constate qu'il devrait rester au niveau de la mer et sur les 568 parvenant à 1910 m avec une vitesse convenable, 27 muons ayant survécu à cette descente supplémentaire. On peut vérifier, sachant que la forme de la distribution est exponentielle, que cette valeur est satisfaisante. En effet on a :

$$N_c = 568.e^{-6{,}4/2{,}2} = 31$$

Ceci est tout à fait compatible avec ce que donne le graphique.

Les deux expérimentateurs, refaisant au niveau de la mer[1], le comptage des muons se désintégrant, vont obtenir plusieurs séries de mesures, comme on peut le voir dans le tableau précédent. Les résultats utilisés dans le film retiennent une valeur de 412 survivants, ce qui est très supérieur au 27 attendus. Si on regarde le diagramme précédent on constate qu'un nombre de 412 survivants correspond à une ligne passant par 0,7 µs.



En résumé, Smith et Frisch ont donc déterminé :

- La distribution statistique de la durée de vie des muons dans un référentiel où ils sont au repos. C'est donc une durée propre.

[1] Pour cela, rappelons le, ils réduisirent la hauteur de la pile de fer pour tenir compte de l'épaisseur supplémentaire d'air traversée tout en conservant à peu près le même domaine de vitesses.

- Le nombre théorique N_T (en mécanique classique où le temps est une grandeur absolue) de muons survivants jusqu'au niveau de la mer après être passés au sommet du Mont Washington ; $N_T = 27$
- Le nombre expérimental N_E de muons survivants au niveau de la mer (Cambridge) après être passés au sommet du Mont Washington dans un intervalle de temps du laboratoire de $\Delta t_L = 6{,}4$ µs. $N_E = 412$
- La durée au bout de laquelle il reste, dans le référentiel de repos du muon (graphique de la première série de mesures), un nombre de 412 de survivants. Ils trouvent $\Delta t_M = 0{,}7$ µs.

Autrement dit, on peut affirmer qu'une durée de 6,4 µs dans le repère du laboratoire ne correspond plus qu'à une durée de 0,7 µs dans celui du muon. C'est le phénomène relativiste de dilatation du temps. On peut alors calculer le facteur γ puisque nous avons la relation $\Delta t_L = \gamma.\Delta t_M$.

$$\gamma = \frac{\Delta t_L}{\Delta t_M} = \frac{6{,}4}{0{,}7} \approx 9$$

Dans le film, la détermination du facteur γ est faite de cette façon, sans développer la manière suivante qui ne l'est que dans l'article de l'AJP.

En effet pour vérifier ce que prévoit la relativité restreinte, on peut également faire le calcul en s'appuyant sur l'expression de γ en fonction de **V**. Pour cela il faut connaître **V**. Les mésons qui parviennent au- dessus des 76 cm de fer sur le Mont Washington, sont ralentis et stoppés dans le plastique et ont une vitesse incidente comprise entre 0,9950c et 0,9954c. On pourrait prendre la valeur médiane du sélecteur de vitesses, c'est-à-dire :
$\beta_w = V/c = 0{,}9952$ mais, au niveau de la mer, le spectre des vitesses incidentes des mésons arrivant au-dessus de 46 cm de fer ne s'étend[2] que de 0,9881c à 0,9897c avec une valeur moyenne de 0,9889c. On peut alors calculer deux valeurs de γ :

$$\gamma_W = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta_W{}^2)}} = \frac{1}{\sqrt{(1-0{,}9952^2)}} = 10{,}2$$

$$\gamma_L = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta_L{}^2)}} = \frac{1}{\sqrt{(1-0{,}9889^2)}} = 6{,}8$$

[2] Cette différence provient d'une mauvaise évaluation de la hauteur de barre de fer à enlever en revenant au niveau de la mer.

On peut faire un calcul simplifié en prenant la moyenne de ces deux valeurs. On a alors :

$$\gamma = \mathbf{8{,}5}$$

Ce résultat est tout à fait compatible avec le précédent, sachant qu'il y a plusieurs causes d'imprécisions. Ces dernières sont étudiées dans l'article qui va plus loin dans les calculs et fait également une analyse complète des causes d'erreurs et d'incertitudes. Il contient également une évaluation de l'encadrement Δγ pour les deux méthodes.

Analyse de l'expérience et des résultats

Dans l'article paru dans l'AJP Frisch et Smith font un bilan détaillé[3] de toutes les causes perturbatrices de leur expérience :

- Formation des muons ;
- Interaction des muons durant leur vol ;
- Évaluation de la vitesse des muons ;
- Influence de la forme de la loi de distribution sur l'expérience :
- Interaction entre les muons au repos ;
- La perte de comptage après 8,5 µs ;
- Coïncidences temporelles accidentelles liées au bruit de fond ;
- Effets sur la dilatation du temps de la décélération des mésons en vol ;
- Effet des mésons non verticaux.

On ne détaillera pas ici chacun de ces points mais on pourra les retrouver dans l'article original et, pour ceux qui ont des difficultés avec l'anglais, dans sa traduction qui est disponible sur demande.

Utilisation pédagogique du film et de l'article

Disponibilité des documents

Comme indiqué plus haut, cette expérience a donné lieu à un film pédagogique de 36 min réalisé avec les deux physiciens. Il est visible sur plusieurs sites Internet. On peut citer, par exemple, les URL suivantes :

http://www.scivee.tv/node/2415
http://bestphysicsvideos.blogspot.com/2011/02/time-dilation-experiment-with-mu-mesons.html

Ces liens sont directement accessibles sur le site du CLEA aux pages sommaire du CC 139
http://www.ac-nice.fr/clea/SommCC139.html

[3] Ce point est abordé d'une manière rapide dans le film

Le script des dialogues n'étant pas disponible, j'en ai réalisé la traduction pour créer un fichier srt de sous-titrage (disponible sur demande) permettant d'exploiter le document avec des élèves à l'aide de n'importe quel logiciel de lecture vidéo.
L'article de l'AJP est également consultable sur Internet. On peut le trouver sur :
http://www.physics.umt.edu/physics141/frisch-smith.pdf

Comme déjà indiqué, je l'ai également traduit et mettrai ce travail en ligne pour ceux qui sont intéressés. (*voir en fin d'article*).

Quelques exemples d'utilisation pédagogique

Dans le cadre des nouveaux programmes de physique de TS, il est possible de construire plusieurs activités avec des élèves à partir de cette expérience particulièrement riche. On peut envisager :

Interprétations classique et relativiste des résultats

Un calcul simple montre qu'en renonçant à appliquer la relativité restreinte, il n'est pas possible d'expliquer que les muons atteignent en nombre aussi élevé le niveau de la mer. En effet, les muons mettraient 6,4 µs pour parcourir les 1907 m de dénivellation et le nombre de muons qui atteindraient le niveau de la mer serait seulement de quelques dizaines (27 mesuré et 31 calculé). Seule la dilatation relativiste du temps – ainsi que la contraction des longueurs mais elle n'est pas au programme - nous donne une explication satisfaisante.
L'intervalle de temps entre les événements « le muon passe au sommet du Mont Washington » et « le muon passe à Cambridge » est un intervalle de temps propre Δt_0 pour le muon et un intervalle de temps impropre $\Delta t'$, beaucoup plus grand, pour l'expérimentateur dans son laboratoire terrestre.
Comme $\Delta t'$ = 6,4 µs et **V** = 0,9952c on obtient pour la durée du parcours dans le référentiel du muon :
Numériquement nous obtenons Δt_0 = 0,63 µs.

$$\Delta t' = \gamma.\Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{(1-\beta^2)}} \quad \textit{donc} \quad \Delta t_0 = \sqrt{(1-\beta^2)}.\Delta t'$$

De même, la durée de vie de 2,2 µs est un intervalle de temps propre τ_0 pour le muon et un intervalle de temps impropre τ'_0, considérablement allongé, pour les expérimentateurs terrestres.

$$\tau' = \gamma.\tau_0 = \frac{\tau_0}{\sqrt{(1-\beta^2)}}$$

Le calcul nous donne τ' = 22,5 µs.

Dans le référentiel du muon, la durée de vie vaut 2,2 µs et la durée du parcours 0,63 µs. Le calcul du nombre de muons atteignant le niveau de la mer donne donc:

$N_c = N_w . e^{-0,63/2,2}$ ***avec*** $N_w = 563$
Donc $N_c = 563 \times 0,751 = 423$

Dans le référentiel terrestre, la durée de vie vaut 22,5 µs et la durée du parcours 6,4 µs. En refaisant le même calcul nous obtenons :

$N_c = N_w . e^{-6,4/22,5}$ ***avec*** $N_w = 563$
Donc $N_c = 563 \times 0,752 = 424$

On trouve, aux arrondis de calcul près, la même valeur. La réciprocité des effets est bien vérifiée.
On peut également interpréter les résultats à partir du point de vue du muon sur la distance parcourue. Celui-ci voit arriver vers lui, à une vitesse de 0,9952.c, le sommet du Mont Washington puis le laboratoire de Cambridge. Dans le référentiel du muon, la distance D' à parcourir est la longueur d'un « objet en mouvement », qui est beaucoup plus courte que la distance (longueur propre) D_0 = 1907 m mesurée dans le référentiel terrestre. On a :

$D' = (1-\beta^2)^{1/2} . D_0$

donc : $D' = 0,0979 \times 1907 = 187$ **m**

Pour le muon, cette courte distance sera parcourue par la Terre qui vient à sa rencontre, en 0,63 µs.

■

NDLR : Vous pouvez retrouver les différents fichiers déposés par Pierre Magnien Dans l'espace "LUNAP" réalisé par le CLEA à l'adresse suivante :
http://acces.ens-lyon.fr/clea/lunap/Relativite/relativite-restreinte-principes-et-applications