

Activité documentaire – relativité de la durée.

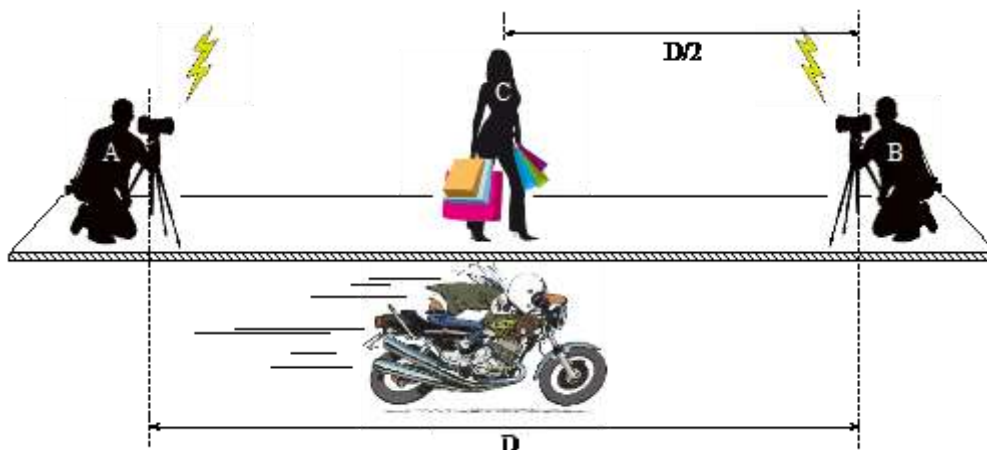
Doc 1 – vitesse de la lumière et référentiels.

La vitesse de la lumière dans le vide, ou célérité de la lumière, est approximativement de $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette vitesse est-elle plus grande quand on la mesure dans un train qui se déplace à 300 km/h , ou sur la Terre qui se déplace à $100\,000\text{ km/h}$?

L'expérience de Mickelson et Morley, entre autres, réalisée en 1887, montre que la vitesse de la lumière est la même dans une direction tangente à l'orbite de la Terre autour du Soleil, c'est-à-dire dans la direction de son déplacement, et dans une direction perpendiculaire à son déplacement. Ce qui signifie que la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse du référentiel par rapport auquel on la mesure.

Doc 2 – Simultanéité de deux événements

Que deux événements soient simultanés ou qu'au contraire l'un soit antérieur à l'autre est une alternative évidente dans la conception newtonienne de l'espace et du temps et dans la vie quotidienne. Pourtant, les postulats de la relativité nient ce caractère absolu de la simultanéité. Supposons qu'une jeune femme C se tienne immobile sur une route rectiligne. Deux photographes, A et B, situés à égale distance de C, appuient au même instant sur le déclencheur du flash de leur appareil. Imaginons que lorsque les deux photographes appuient sur le déclencheur, un motard passe à pleine vitesse à la hauteur de C. Les deux flashes sont-ils simultanément perçus par C et par D ?

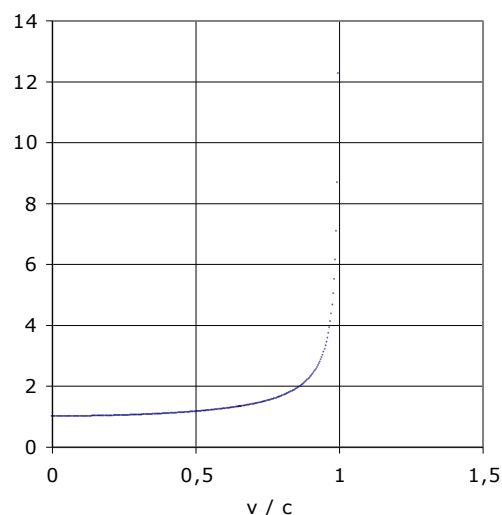


Doc 3 – Dilatation des durées

La durée qui s'écoule entre deux événements, dans un référentiel où ces deux événements arrivent **à deux endroits différents**, est plus longue que la durée entre ces deux mêmes événements **dans un référentiel où ils arrivent au même endroit**, appelé **référentiel propre**. Autrement dit, le temps propre ΔT_0 est toujours inférieur au temps $\Delta T'$ mesuré par un observateur extérieur au "référentiel propre".

On a :
$$\Delta T' = \gamma \cdot \Delta T_0 > \Delta T_0$$

avec :
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Une « expérience de pensée » (*thought experiment, Gedankenexperiment*) est un essai pour résoudre un problème en utilisant la seule puissance de l'imagination humaine.

Ainsi, il semble évident au premier abord que la durée séparant deux événements est la même dans quel que soit l'endroit où l'on se trouve, et quel que soit son mouvement : que l'on soit assis dans un train roulant à 130 km/h ou assis sur une chaise chez soi, la durée d'un battement de cœur, ou la durée d'oscillation d'un pendule, ou la durée nécessaire pour lire ce texte, doit a priori être la même. Autrement dit, la durée entre deux événements semble être indépendante du référentiel choisi.

Mais, finalement, qu'est-ce que le temps ?

- Pour Einstein, le temps est simplement ce que mesure une horloge... mais que mesure une horloge ?

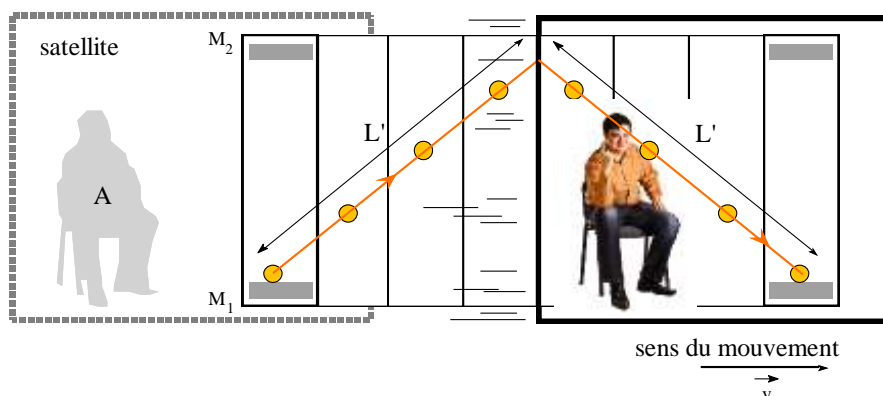
Imaginons une « horloge à photon » constituée d'un simple tube comportant un miroir à chaque extrémité. A l'intérieur, il y a un photon qui oscille périodiquement d'un miroir à l'autre. On définit avec cette horloge un étalon de durée qui est le temps nécessaire au photon pour effectuer un aller-retour dans le tube. On ajoute au dispositif un boîtier électronique qui procède au comptage et l'affichage du nombre des oscillations du photon.

Cette horloge est embarquée dans un satellite animé d'un mouvement rectiligne uniforme par rapport au sol terrestre. On note A et B les observateurs de l'horloge respectivement liés au référentiel « satellite » et au référentiel « terrestre ». Le schéma ci-dessous représente la situation ainsi que la trajectoire du photon lors d'une oscillation.

- Un concept important pour le maniement correct des idées est celui **d'événement**. Les observations du physicien portent sur des « événements », et ces observations peuvent être effectuées à partir de divers référentiels ; on appelle événement tout phénomène physique qui a lieu à un moment donné t , en un point de l'espace déterminé par $M(x, y, z)$. Un événement est donc repéré par quatre coordonnées (x, y, z, t) . Un intervalle de temps entre deux événements est appelé **durée** et est noté Δt .

- On nomme *temps propre* (ou durée propre), ΔT_0 , la durée séparant deux événements ayant lieu au même endroit dans un référentiel galiléen (R). Cette durée est mesurée par une horloge fixe dans ce référentiel galiléen et proche des deux événements.

- On nomme *temps mesuré* (ou durée mesurée), $\Delta T'$, la durée séparant deux événements mesurée par une horloge fixe dans un référentiel galiléen (R') en mouvement par rapport au référentiel galiléen (R) dans lequel on mesure le temps propre.



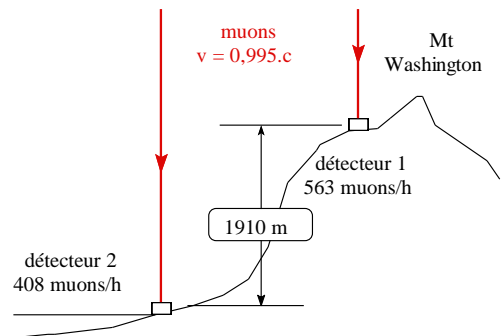
• Les rayons cosmiques *primaires* sont constitués essentiellement de noyaux atomiques venant de l'espace (surtout des protons), dotés de grande énergie et qui frappent la Terre en permanence.

Leurs interactions avec les noyaux de l'atmosphère produisent toute une variété d'autres particules : les rayons cosmiques *secondaires*. L'étude des rayons cosmiques a permis de grands progrès en physique. Avant même l'invention des accélérateurs de particules, elle a contribué à la connaissance de la nature du monde subatomique.



Le muon est une des nombreuses particules secondaires produites en abondance lors de l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère. Cette particule a la même charge électrique que l'électron mais une masse 210 fois plus importante et, contrairement à l'électron, est instable et a une demi-vie très courte. Si on observe un grand nombre de muons dans un référentiel où ils sont immobiles, la moitié de ces particules se seront désintégrées après une durée $t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$.

• Dans l'expérience de Rossi et Hall en 1941, un détecteur de muons est réglé pour détecter les muons se déplaçant au voisinage d'une verticale par rapport à la Terre à la vitesse moyenne de $0,995.c$. Ce détecteur est situé à 1910 mètres d'altitude au sommet du Mont Washington (USA) et enregistre 563 muons par heure. Un second détecteur, identique, est situé au niveau de la mer et enregistre 408 muons par heure.

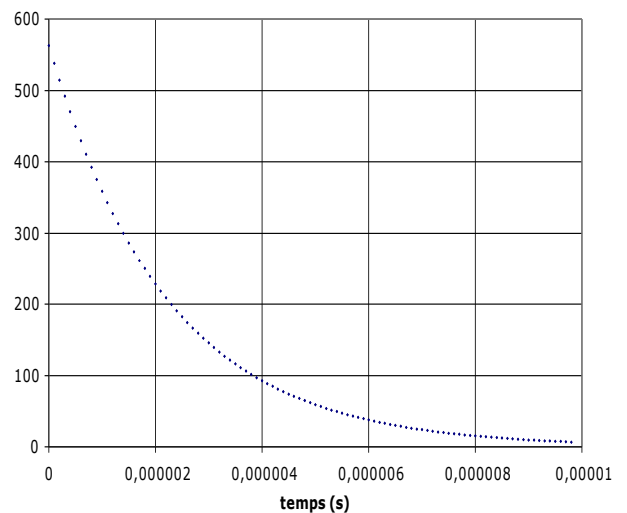


Loi de décroissance des muons

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{t}{t_{1/2}}}$$

Mesurée dans le référentiel terrestre, la durée nécessaire pour qu'un muon parcoure une distance de 1910 mètres est de $6,40 \mu\text{s}$, soit près de quatre fois sa demi-vie. S'il y avait en moyenne 563 muons par heure au sommet, on s'attendrait à en observer environ une trentaine seulement au niveau de la mer.

L'incompatibilité entre prévision et expérience s'explique par la dilatation du temps car dans le référentiel où un muon est immobile il s'est écoulé seulement $0,64 \mu\text{s}$ pour ce parcours. L'évolution en fonction du temps du nombre de particules restantes obéit à une loi dite de décroissance. En appliquant cette loi pour une durée de parcours de $0,64 \mu\text{s}$, on trouve 421 muons par heure détectés au niveau de la mer.



Questionnaire (Doc 3 & 4)

On considère les deux événements suivants décrits dans le doc 4 :

E_1 : le photon quitte M_1

E_2 : le photon rejoint M_1 après un aller-retour dans le tube de verre

- 1 . Montrer que les durées mesurées entre E_1 et E_2 sont différentes selon le référentiel d'étude. Comparer ces durées.
- 2 . En observant le schéma du document 4, identifier le référentiel propre et celui qui ne l'est pas.
- 3 . Pour quelle raison l'intervalle de temps entre deux événements mesurés dans deux référentiels différents ne peut pas être identique ?
- 4 . Exprimer les longueurs L et L' parcourues par le photon respectivement dans (R) et (R') , en fonction de ΔT_0 , $\Delta T'$ et c (vitesse de la lumière dans le vide).
- 5 . Déterminer la longueur L' parcourue par le photon en fonction de L , v et ΔT_0 .
- 6 . En déduire le rapport entre $\Delta T'$ et ΔT_0 . Que peut-on en conclure ?

Questionnaire (Doc 3)

- 1 . Quelle valeur de γ correspond à une augmentation de 10% des durées ?
- 2 . Pour quelle valeur de la vitesse relative v , en km.s^{-1} , observe-t-on une telle dilatation des durées ?
- 3 . Pourquoi les effets de la relativité restreinte n'ont-ils été observés par l'homme que tardivement dans l'histoire des sciences ?

Questionnaire (Doc 5)

- 1 . Une durée sépare deux événements. Dans le document 7, de quels événements s'agit-il ?
 - 2 . Quel est le référentiel propre (R) où ces deux événements ont lieu au même endroit ?
 - 3 . On nomme *temps propre* (ou durée propre), ΔT_0 , la durée séparant deux événements ayant lieu au même endroit dans un référentiel galiléen (R) . Que vaut ΔT_0 ?
 - 4 . On nomme *temps mesuré* (ou durée mesurée), $\Delta T'$, la durée séparant deux événements mesurée par une horloge fixe dans un référentiel galiléen (R') en mouvement à vitesse constante par rapport au référentiel galiléen (R) dans lequel on mesure le temps propre. Que vaut $\Delta T'$?
 - 5 . Calculer le temps que met un muon pour parcourir les 1910 m à la vitesse de $0,995.c$, dans le référentiel terrestre.
 - 6 . En raisonnant en mécanique classique (c'est-à-dire sans prendre en compte la dilatation de la durée de demi-vie des muons), combien de muons devrait-on détecter au niveau du sol ? On pourra exploiter le graphique du document 7.
 - 7 . En utilisant la relativité restreinte, combien de muons devrait-on détecter au niveau du sol ?
-