

Physique chimie Terminales 2012

Temps et relativité restreinte

1. PHYSIQUE–CHIMIE BO n° spécial n° 8 du 13 octobre 2011

2. Vidéos téléchargeables à partir du « SITE TV »

3. Temps et relativité restreinte : postulats et conséquences

Le principe de la relativité de Galilée

L'expérience qui traumatisa les physiciens

Notion de temps propre : le temps ralenti par la vitesse !

1. PHYSIQUE–CHIMIE BO n° spécial n° 8 du 13 octobre 2011

CLASSE TERMINALE DE LA SERIE SCIENTIFIQUE ENSEIGNEMENT SPECIFIQUE

COMPRENDRE Lois et modèles	Temps, mouvement et évolution :	Temps et relativité restreinte
---	--	---

La définition du temps atomique et la réalisation des horloges associées font accéder à des échelles de précision telles qu'elles mettent directement en évidence le caractère relatif du temps en fonction de la vitesse relative de l'horloge et de l'observateur, qui est à la base de la relativité restreinte.

Les postulats d'Einstein (1905), qui constituent cette base, aboutissent à affirmer que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens. C'est une constante fondamentale de la physique.

L'étude de cette propriété fondamentale dans le cadre d'un enseignement illustre bien la problématique du choix didactique face à la subtilité de la démarche scientifique. Cette subtilité est en l'occurrence celle de l'interrogation d'Einstein se posant la question de l'unité de la physique, entre l'électromagnétisme faisant apparaître une vitesse de propagation des ondes dans le vide indépendante du référentiel et la mécanique newtonienne posant l'additivité des vitesses, sans que l'on sache vraiment si la réponse d'Einstein avait pu être inspirée de tests expérimentaux comme l'expérience de Michelson et Morley.

La réponse d'Einstein sous forme de postulat remet en cause le cadre de la mécanique newtonienne, à savoir une vitesse de la lumière relative et un temps absolu, au profit d'une vitesse de la lumière absolue et un temps relatif.

L'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide a été abondamment confirmée par l'expérience (prisme mobile d'Arago 1810, Michelson et Morley 1887, Alväger 1964, Hall Brillet 1979, étoiles doubles, etc.). La liberté didactique du professeur consiste à faire un choix, notamment entre une approche historique, pouvant d'emblée annoncer le postulat et le faire suivre par des tests expérimentaux, et une approche plus « pédagogique », partant des résultats expérimentaux pour rendre plus naturelle ensuite l'hypothèse d'Einstein. En ce sens, le programme se présente selon un ordre qui ne saurait être prescriptif, selon l'esprit général qui l'anime.

Il en va de même du caractère relatif du temps, entre ses notions afférentes (événement, temps propre, temps mesuré, dilatation des durées) et ses confirmations expérimentales ou situations concrètes (désintégration des muons dans l'atmosphère, particules instables dans les accélérateurs, horloges atomiques embarquées, GPS, etc.). À ce titre, on remarquera que la dilatation des durées se prête à analyse quantitative : la relation $\Delta t_m = \gamma \Delta t_p$ avec $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ entre durée mesurée et durée propre peut être aisément justifiée (horloge de lumière, « expérience » de la lumière émise dans un bateau).

Notions et contenus	Compétences expérimentales exigibles	Supports vidéos disponibles (non exhaustif)
Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps Postulat d'Einstein. Tests expérimentaux de l'invariance de la vitesse de la lumière.	Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.	<ul style="list-style-type: none"> Site TV La relativité restreinte (invariance de c, paradoxe des jumeaux, correction des GPS) Site TV La lumière a-t-elle une vitesse constante ? (éther, exp. Michelson et Morley, invariance de c) Michelson-Morley-Experiment (l'expérience de M et M) http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/index.html Université de New South Wales (Sydney-Australie) : site présentant plusieurs animations donnant un aperçu de la relativité. Les différentes animations peuvent être sous-titrées en français.
Notion d'évènements. Temps propre. Dilatation des durées. Preuves expérimentales.	Définir la notion de temps propre. Exploiter la relation entre la durée propre et la durée mesurée. Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète ou le caractère relatif du temps est à prendre en compte.	<ul style="list-style-type: none"> http://www.youtube.com/watch?v=h6V-VEg6pzi En français : Principe de la relativité des vitesses en physique classique, constance de la vitesse de la lumière, principe de l'horloge de lumière (voir exploitation possible page suivante). http://www.youtube.com/watch?v=KHjpBjglMVk En anglais : présentant le principe de l'horloge de lumière. Deux vaisseaux spatiaux voyagent ensemble à une vitesse proche de celle de la lumière. En anglais : <ul style="list-style-type: none"> - Caltech: The Mechanical Universe – 41 – The Michelson-Morley Experiment - Caltech: The Mechanical Universe – 42 – The Lorentz Transformation - Caltech: The Mechanical Universe – 43 – Velocity and Time

2. Vidéos téléchargeables à partir du « SITE TV »

LA RELATIVITÉ RESTREINTE

http://www.lesite.tv/videotheque/16-offre-etablissement/9-enseignements-transversaux/6-culture-scientifique-et-technique/7-histoire-des-sciences-et-des-techniques/11-sciences-physiques-et-chimiques_2/0000.0950.00-la-relativite-restreinte

Réalisation : Philippe Tourancheau

© SCÉRÉN-CNDP, France 5, 2005

Durée : 07 min 00 s

Nous sommes en mai 1905 ; Einstein termine les quatre articles qui vont révolutionner la physique moderne. Le film se propose d'expliquer celui qui va remettre en cause l'espace et le temps en interprétant correctement l'expérience de Michelson et Morley (cf. la séquence : *La lumière a-t-elle une vitesse constante ?*). Le film est constitué de séquences très différentes (entretiens, animations...) qui permettent de comprendre de façon claire la remise en cause du temps absolu. Il se termine par deux séquences expliquant le paradoxe des jumeaux de Langevin et la nécessité de recalibrer les horloges pour le système de positionnement GPS.

LA LUMIÈRE A-T-ELLE UNE VITESSE CONSTANTE ?

http://www.lesite.tv/videotheque/16-offre-etablissement/9-enseignements-transversaux/6-culture-scientifique-et-technique/7-histoire-des-sciences-et-des-techniques/11-sciences-physiques-et-chimiques_2/0000.0945.00-la-lumiere-a-t-elle-une-vitesse-constante

Réalisation : Philippe Tourancheau

© SCÉRÉN-CNDP, France 5, 2005

Durée : 04 min 13 s

À la fin du XIX^e siècle, la physique repose sur certaines certitudes : entre autres, la lumière est une onde qui se propage dans une substance appelée éther. Ce milieu dans lequel se propage la lumière, par analogie avec le son dans l'air, devait posséder des propriétés extraordinaires pour que la vitesse y soit aussi grande. Afin de vérifier la nature de cet éther, les physiciens vont mesurer la vitesse de la lumière par rapport à lui. L'expérience de Michelson et Morley en 1887 va ouvrir une voie nouvelle et inattendue : la lumière ne suit pas la loi de composition des vitesses.

À travers une série d'animations de qualité, ce film raconte cette histoire en deux parties. Il présente le paradoxe de la lumière qui se propage dans le vide puis il explique le principe de l'expérience de Michelson et Morley.

ETIENNE KLEIN : LA PHYSIQUE

© lesite.tv, 2005

Etienne Klein, passionné de vulgarisation scientifique, est chercheur au CEA (Commissariat à l'énergie atomique). Il est également professeur de physique à l'École centrale, à Paris. Il a écrit « Il était sept fois la révolution » qui est un hommage appuyé et extrêmement vivant à Albert Einstein et à tous les autres physiciens qui sont les pères de la physique moderne.

Dans ces entretiens, Etienne Klein nous retrace une partie de l'histoire des sciences, mettant en exergue son lien avec l'Histoire et ses conséquences dramatiques.

A quoi peut servir la philosophie quand on fait de la physique et qu'on s'intéresse aux atomes ? Etienne Klein se pose la question, en nous montrant comment la philosophie permet de clarifier le travail du physicien.

SÉQUENCE 1 : Les premières lois de la physique (06 min)

Etienne Klein, il y a eu une révolution en physique au début du XX^e siècle. Mais regardons d'abord ce qui s'est passé avant le XX^e siècle ; qu'est-ce qu'on savait finalement en physique ? Que savaient les grands physiciens ? Quelles étaient les grandes découvertes, les grandes données ?

SÉQUENCE 2 : La révolution de la physique (05 min)

Etienne Klein, la physique a connu plusieurs révolutions, mais vraiment des révolutions de ce qu'on savait de la physique au début du siècle dans les années 1900-1905, et en particulier on a découvert la physique quantique. Alors quantique, ça veut dire quoi ?

SÉQUENCE 3 : Einstein et les autres (05 min 35 s)

Etienne Klein, il y a au début du vingtième siècle une révolution de la physique absolument phénoménale peut-être sans comparaison, et cette révolution, elle a été conduite par des hommes, peut-être des femmes, où sont-ils ? Est-ce qu'ils travaillent ensemble ? Qui sont-ils ?

SÉQUENCE 4 : Les nouvelles perspectives de la physique (05 min 10 s)

Etienne Klein, quels ont été finalement les produits de cette révolution extraordinaire qu'a connue la physique dans le premier tiers du vingtième siècle, aujourd'hui ?

SÉQUENCE 5 : Mon métier de physicien (05 min 28 s)

Etienne Klein, vous êtes physicien, vous enseignez la physique, et également la philosophie des sciences, mais un petit flash-back d'abord alors sur votre itinéraire personnel. Physicien, comment ? Vocation très jeune, révélation à l'école ? C'est quoi ?

3. Temps et relativité restreinte : postulats et conséquences

A-Le principe de la relativité de Galilée

Importance du choix du référentiel pour décrire le mouvement :

- **situation navette spatiale**

Vous êtes dans votre navette spatiale, sans repère visuel, par le hublot vous observez un astéroïde qui vous a frôlé (en se déplaçant de droite à gauche), choisir parmi les propositions :

- vous en concluez que l'astéroïde vous a foncé dessus (vous êtes immobile et l'astéroïde se déplace de droite à gauche)
- vous avez fait une erreur de conduite (l'astéroïde est immobile et vous vous déplacez de gauche à droite)



Réflexion : Qui est en mouvement ?

Comment savoir si vous êtes en mouvement ?

- **vidéo d'un même phénomène vu de deux référentiels différents, utilisation de la webcam**

Réflexion :

Comment savoir si vous êtes en mouvement et en mouvement par rapport à quoi ?

Le scientifique s'exprimera ainsi :

L'astéroïde est en mouvement « par rapport » à la navette (tout devient plus clair !?).

Le mouvement est donc relatif, relatif à un référentiel.

Mais existe-t-il un référentiel particulier / un référentiel absolu dans lequel je puisse affirmer que la navette est immobile et l'astéroïde en mouvement : exemple la Terre ? Le centre de la galaxie ? Le centre de l'Univers ?

Affirmation de Galilée :

Dans un mobile complètement fermé sur lui-même et donc sans référence extérieure, il n'y a pas de différence entre le mouvement uniforme et le repos. Il est impossible de mettre en évidence le mouvement d'un système physique animé d'un mouvement rectiligne et uniforme, par une expérience de mécanique réalisée à l'intérieur du système.

Conclusion : Si tous les phénomènes (chute d'une balle, ...) se déroule de la même manière dans un système au repos ou dans un système en mouvement rectiligne et uniforme, c'est que les lois de la mécanique auxquelles ils obéissent sont bien les mêmes dans les deux cas.

Les lois de la mécanique sont donc absolues et ne dépendent pas du référentiel galiléen dans lequel on les étudie. Il n'y pas de référentiel galiléen meilleur qu'un autre, ils sont tous équivalents.

Premier postulat : le principe de la relativité

Toutes les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens.

B-L'expérience qui traumatisa les physiciens

Vision de la lumière avant Einstein (19^{ème} siècle) :
une **onde** est une oscillation d'**un milieu matériel**.

Onde sonore : oscillations des molécules d'air ;
Onde à la surface de l'eau : oscillations des molécules d'eau.

Questionnement :

De quel milieu les ondes électromagnétiques sont-elles l'oscillation ?

Henri Poincaré : « l'onde électromagnétique est une vibration de l'**éther** ; puisque la lumière nous parvient des plus lointaines étoiles, cet éther emplit nécessairement tout l'espace et constitue donc le milieu ultime de l'Univers »

Ether : milieu peu dense car les planètes s'y déplacent sans rencontrer de résistance,
milieu rigide car les ondes électromagnétiques s'y déplacent à grande vitesse.

Peu dense / rigide : en contradiction...

En 1887, Albert Michelson et Edward Morley réalisent une expérience qui devait mettre en évidence l'éther.

Suivons leur raisonnement : dans son mouvement autour du Soleil la Terre se déplace par rapport à l'éther.

Pour A. Michelson, comme pour la totalité des physiciens de l'époque, tout comme un projectile, une onde m'arrive moins rapidement si je la fuis que si je cours à sa rencontre. La Terre devrait donc voir le signal lumineux lui arriver moins vite lorsqu'elle se déplace dans le même sens que lorsqu'elle court à sa rencontre.

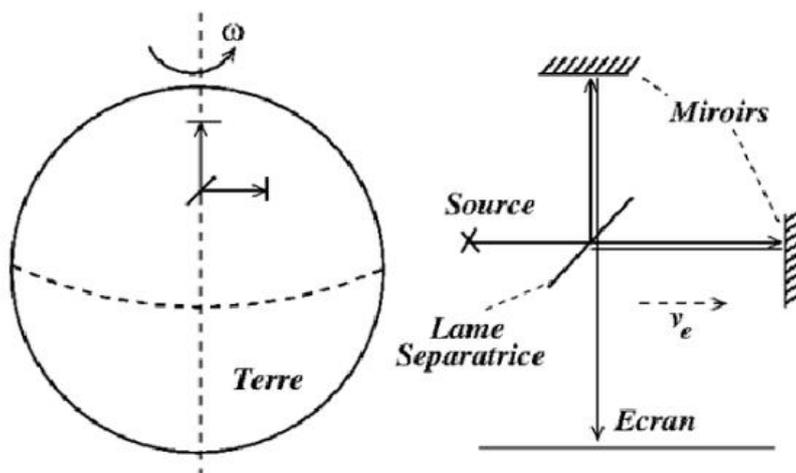
Expérience de Morley et Michelson (1887) :

Un interféromètre est placé sur la Terre l'un des bras dans la direction du mouvement de la Terre, l'autre perpendiculaire. Si la vitesse de lumière (et donc le temps de parcours) est légèrement différent dans les deux bras à cause de la rotation de la Terre par rapport à l'éther, il doit se produire un phénomène d'interférences.

Résultat : malgré de nombreuses tentatives, **aucun phénomène d'interférences n'est observé**.

Illustration :

<http://www.youtube.com/watch?v=8QUhgYaxWao>



Pour les physiciens de l'époque l'expérience est inexplicable.

Il fallu attendre 1905 pour Albert Einstein expose son postulat :

Deuxième postulat : le principe de la constance de la vitesse de la lumière

La vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.
Elle est indépendante du mouvement de sa source ou de l'observateur.

Le concept d'éther perd alors tout son sens et est abandonné.

Il fallait repenser la mécanique : l'invariance de la vitesse de la lumière implique la relativité du temps.

C- Notion de temps propre : le temps ralenti par la vitesse !

On suppose que A et B sont deux événements se produisant **au même endroit** dans un référentiel R_0 , appelé **référentiel propre**.
L'intervalle de temps entre ces deux événements Δt_0 mesuré à l'aide de l'horloge liée à R_0 est appelé **durée propre** ou **temps propre** entre A et B

Exemple 1 : Dans un train

On fait cuire un œuf dans un train en mouvement.

La **durée propre** Δt_0 de cuisson est mesurée par une horloge fixe dans le train (référentiel train).

La **durée impropre mesurée** dans le référentiel terrestre Δt est la durée mesurée entre deux positions du train sur Terre, il y a alors nécessité de deux horloges synchronisées dans le référentiel Terre : la première dans la gare n°1 (début de la cuisson), la deuxième dans la gare n°2 (fin de la cuisson).

Exemple 2 : Dilatation du temps

(texte du document vidéo ANNEXE 2 et exploitation possible avec ressource sur le site académique)

Voir une partie du document vidéo : (à partir de 5 min 23)

<http://www.youtube.com/watch?v=h6V-VEg6pzi>

On mesure la durée nécessaire au laser pour faire l'aller-retour.

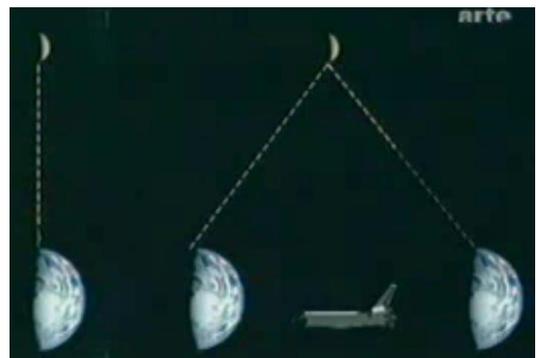
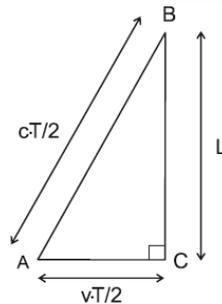
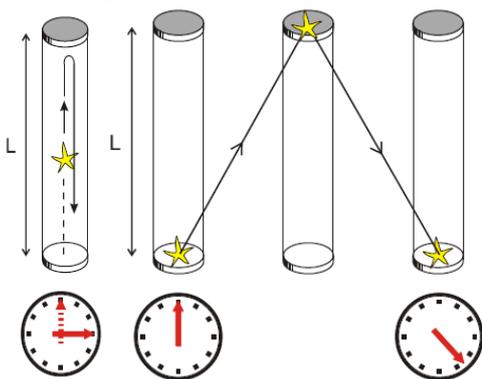
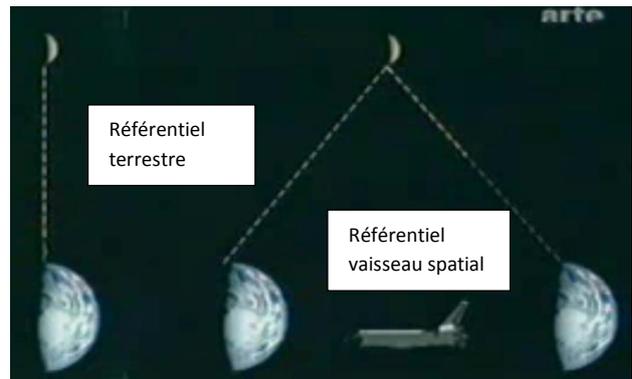
Dans quel référentiel détermine-t-on : la durée propre de l'événement ? Et la durée mesurée de l'événement ?

Exemple :

Les astronomes envoient un rayon laser vers la Lune et déterminent la distance en fonction du temps nécessaire pour faire l'aller-retour. Le rayon laser fait un mouvement de va-et-vient. Tic, tac, comme le pendule d'une horloge de lumière.

Mais qu'observe un astronaute dans un vaisseau spatial qui passe à proximité de la Terre et de la Lune ?

Du point de vue de l'astronaute, le rayon laser doit parcourir une distance plus longue. Etant donné que la lumière ne peut avoir qu'une seule vitesse, elle ne peut pas compenser la différence. C'est pour cette raison qu'elle a besoin de plus de temps. Ainsi, du point de vue de l'astronaute, le pendule de la lumière marche plus lentement. Vu du vaisseau spatial, le temps se dilate donc entre la Terre et la Lune.



Le théorème de Pythagore appliqué au triangle rectangle ABC permet d'écrire :

Avec $L = cT_0 / 2$, il vient :

Donc $T > T_0$, la durée mesurée par l'astronaute dans le vaisseau est supérieure à celle mesurée sur Terre.

$$\frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Avec : $\beta = \frac{v}{c}$ et : $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ facteur de Lorentz

$$\left(c \frac{T}{2} \right)^2 = \left(v \frac{T}{2} \right)^2 + L^2$$

$$\left(c \frac{T}{2} \right)^2 = \left(v \frac{T}{2} \right)^2 + \left(c \frac{T_0}{2} \right)^2$$

$$(cT)^2 - (vT)^2 = (cT_0)^2$$

$$T^2 = \frac{(cT_0)^2}{c^2 - v^2} = \frac{T_0^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Exemple 3 : Vérification expérimentale de la dilatation des durées, l'exemple des muons

Les muons sont des particules élémentaires produites dans la haute atmosphère par bombardement avec les protons du rayonnement cosmique, et qui se désintègrent spontanément pour donner d'autres particules. Si on a N_0 muons à l'instant $t = 0$, on observe qu'à un instant ultérieur t , il en reste :

$$N = N_0 e^{-\ln 2 \frac{t}{T}}$$

où $T = 1,5 \mu s$ est la demi-vie des muons *mesurée dans un référentiel où les muons sont au repos*.

Expériences des muons (B. Rossi et D. B. Hall en 1941)

L'expérience consistait à compter le nombre N_1 de muons détectés par heure au sommet du Mount Washington (New Hampshire, altitude 1910 m) ainsi que celui N_2 détecté au niveau de la mer (altitude 3 m). Le compteur fut réglé pour compter les muons ayant une vitesse égale à $0,995c$.

Les résultats furent les suivants :

$N_1 = 563 \pm 10$ muons et $N_2 = 408 \pm 9$ muons.

Un calcul simple montre qu'en absence de considérations relativistes, il n'y a pas moyen d'expliquer que les muons atteignent en nombre tellement élevé le niveau de la mer. En effet, les muons mettraient $6,4 \mu s$ pour parcourir les 1907 m et le nombre de muons qui atteindraient le niveau de la mer serait seulement de :

La dilatation du temps nous fournit l'explication correcte.

L'intervalle de temps entre les événements "le muon passe au Mount Washington" et "le muon passe au niveau de la mer" est un intervalle de temps propre Δt_0 pour le muon et un intervalle de temps impropre Δt , beaucoup plus grand, pour l'observateur terrestre.

Comme $\Delta t = 6,4 \mu s$ et $v = 0,995c$ on obtient pour la durée du parcours *vue par le muon*, durée propre :

$$\Delta t_{propre} = \Delta t_{impropre} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Leftrightarrow \Delta t_0 = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,64 \mu s$$

De même, la demi-vie de $1,5 \mu s$ est un intervalle de temps propre pour le muon et un intervalle de temps impropre, considérablement allongé, pour l'observateur terrestre.

$$T_{impropre} = \frac{T_{propre}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 15 \mu s$$

Dans le référentiel du muon, la demi-vie vaut $1,5 \mu s$ et la durée du parcours $0,64 \mu s$. Le nombre de muons atteignant le niveau

de la mer vaut donc : $N_2 = N_1 e^{-\ln 2 \frac{0,64}{1,5}} = 419$ (bonne concordance compte tenu des erreurs expérimentales)

Dans le référentiel terrestre, la demi-vie vaut $15 \mu s$ et la durée du parcours $6,4 \mu s$. On trouve le même nombre N_2 .

Autre raisonnement possible :

La durée de vie propre de la particule (c'est à dire son temps moyen d'existence « à sa propre montre ») peut être mesurée en laboratoire. On constate que cette durée de vie propre est de l'ordre de $\Delta t_0 = 2,2 \mu s$.

Si les durées étaient invariantes par changement de référentiel, pendant cette durée de vie propre, le muon parcourrait :

$$d = \Delta t_0 \times 0,995c = 660 \text{ m environ.}$$

Sans considération relativiste, le nombre de muon atteignant la mer devrait être négligeable.

Or dans le référentiel terrestre, la durée moyenne de vie du muon est $\Delta t = \gamma \Delta t_0$, avec $\gamma = 10$, donc $\Delta t = 22 \mu s$.

Il parcourt donc une distance moyenne $d = \Delta t \times 0,995c = 6600 \text{ m environ.}$

On constate expérimentalement que le flux de muons est parfaitement détectable sur Terre au niveau de la mer comme le prévoit le phénomène de dilatation du temps.

Remarque: importance de la dilatation du temps (et de la contraction des longueurs)

L'effet mesuré dans cette expérience est loin d'être négligeable. La désintégration des muons s'est faite à un rythme 10 fois plus lent qu'au repos. Tous les jours, les physiciens qui étudient les particules de haute énergie, travaillant sur des accélérateurs de grande puissance, ont affaire à des particules qui se désintègrent spontanément plus de 100 fois plus rapidement que les muons. Si la dilatation du temps ne jouait pas, elles se désintégreraient et disparaîtraient avant d'avoir parcouru plusieurs mètres, même en se déplaçant presque à la vitesse de la lumière. C'est parce que leur désintégration est ralentie qu'on peut les observer à plus de 100 mètres du point où ils sont produits dans l'accélérateur. On peut, en conséquence, les utiliser dans d'autres expériences. La dilatation du temps devient ainsi une affaire quotidienne pour ces physiciens.

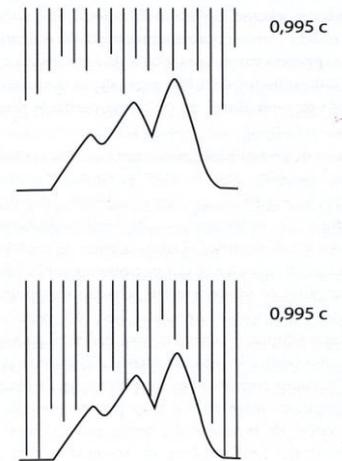


Figure V-3. Dilatation de la durée de vie des muons

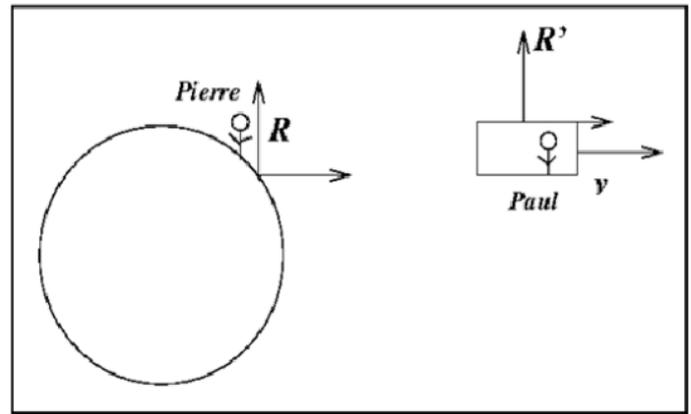
Les traits verticaux représentent les trajectoires parcourues par les muons avant de se désintégrer. D'après les prévisions de la mécanique classique (figure du haut) les muons se désintègrent pratiquement tous dans la haute atmosphère. En leur prévoyant une durée de vie beaucoup plus longue, la théorie relativiste explique leur détection jusqu'au niveau de la mer.

Exemple 4 : Les jumeaux de Langevin

Paul fait un tour dans son vaisseau spatial à la vitesse v .
La durée de vie de Paul évaluée par Pierre, resté sur Terre, Δt est plus longue que la durée de vie propre de Paul Δt_0 .
Observé par Pierre, Paul vieillit moins vite.

Paul est en mouvement par rapport à Pierre. On peut donc faire le même raisonnement pour Paul : il y a symétrie des situations.

D'après Paul, Pierre vieillit moins vite que Paul. Chacun voit vieillir l'autre plus lentement que soit.

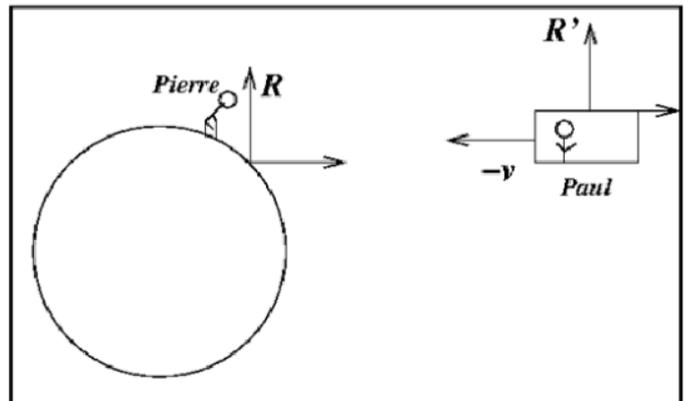


Paradoxe proposé par Langevin en 1911 : lorsque Paul revient sur Terre, Paul est plus jeune que Pierre.

En effet, les deux référentiels ne sont pas équivalents : Paul fait demi-tour il quitte alors de référentiel galiléen (rupture de la symétrie) qui s'éloigne de la Terre, pour un référentiel galiléen qui s'en rapproche.

Le référentiel R et le référentiel R' ne sont équivalents.
Dans le cadre de la relativité générale, Paul vieillit effectivement moins vite que Pierre.

Conclusion : Cette situation sort du contexte de la relativité restreinte.



Exemple 5 : Mise en évidence avec une horloge atomique

Après l'invention de l'horloge atomique qui permet des mesures extrêmement précises, une expérience appropriée a enfin été possible. L'un de ces instruments de précision a été installé dans un avion pour un vol de plusieurs heures. Une deuxième horloge atomique est restée stationnaire sur Terre. On a finalement observé que l'horloge de l'avion était plus lente. Il ne s'agissait que de quelques nanosecondes, mais la différence était réelle et cette infime différence ne tenait qu'à la vitesse de l'avion.

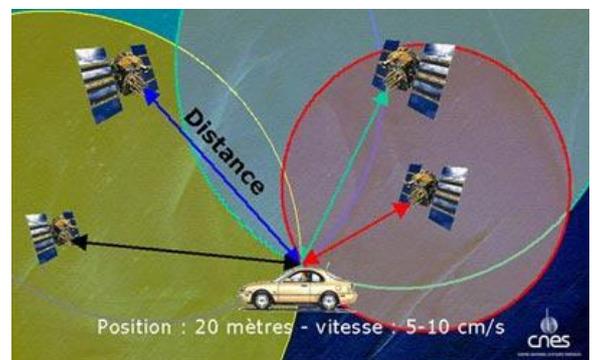
Commentaire : L'horloge atomique embarquée sur un avion et qui revient sur Terre sort du cadre de la relativité restreinte (rupture de la symétrie).

Exemple 6 : le GPS (document texte ANNEXE 3 et exploitation possible avec ressource sur le site académique)

Les horloges des satellites se désynchronisent par rapport au sol : elles vivent en effet au rythme du temps propre du satellite qui diffère du rythme des horloges terrestres.

À une altitude de 20 000 km, le satellite a une vitesse d'environ 3,85 km/s par rapport à la Terre, ce qui entraîne un retard de 82 picosecondes par seconde entre l'horloge de bord et les horloges du sol.

Le retard cumulé est donc d'environ 7,1 microsecondes par jour.



Remarque :

Le nombre de situations concrètes se limitant au cadre de la relativité restreinte (deux référentiels galiléens en mouvement) est donc assez limité.

D'après : Le livre : « L'Univers en perspective- Relativité restreinte » Jean-Marie Vigoureux

La conférence « Eléments de relativité en lien avec le nouveau programme de Terminale Scientifique » animée par M. Pascal Bertin, professeur agrégé de sciences physiques :

http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/67025975/0/fiche_ressourcepedagogique/&RH=PHY