

- Compétences exigibles :
- Définir la notion de temps propre
 - Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée
 - Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte

TP/COURS

L'avènement de la mécanique relativiste montre comment on a dû revenir sur ce que l'on croyait être des certitudes : le caractère absolu de la mesure du temps.

1 Les postulats d'Einstein

En juin 1905, dans son article intitulé De l'électrodynamique des corps en mouvement, (*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*), Albert Einstein présenta sa théorie à partir des deux postulats suivants :

Postulat 1

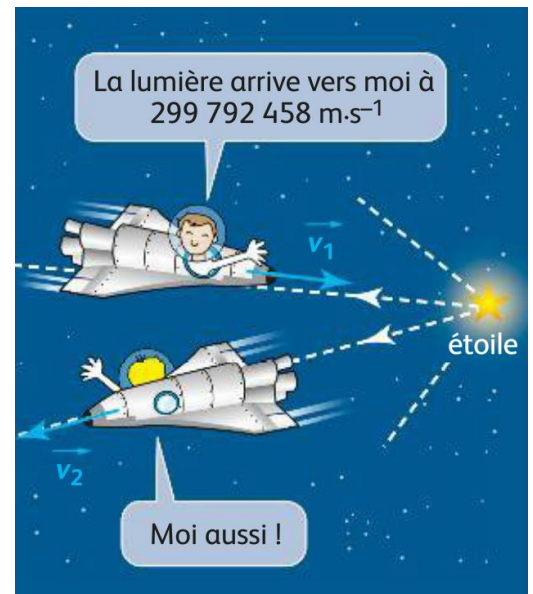
Les lois de la physique s'expriment de la même façon dans tous les référentiels galiléens.

Postulat 2

La vitesse de propagation de la lumière dans le vide est indépendante du mouvement de la source lumineuse et elle est invariante dans tout changement de référentiel galiléen

Conséquence

Il existe une vitesse limite, égale à la célérité c de la lumière dans le vide, qui ne peut être dépassée par aucun signal transportant une information, ni aucune particule. Elle ne peut être atteinte que par les particules de masse nulle comme le photon.



1. Qu'est-ce qu'un postulat en sciences ? Quelle est la différence avec un axiome ? avec un théorème ?

2 Dilatation des durées

1. Relativité du temps

Voici comment, en quelques lignes, Newton, en 1687, dans ses Principes mathématiques de la philosophie naturelle, traitait la question de la mesure des durées :

« Sans relation à rien d'extérieur, le temps absolu, vrai, mathématique, s'écoule uniformément et s'appelle la durée »

La physique de Newton suppose que le temps d'écoule uniformément dans tous les référentiels. Or cela est incompatible avec le postulat de la constance de c .

Selon la théorie de la relativité restreinte, le temps dépend du référentiel d'étude.

2. Expériences de pensée

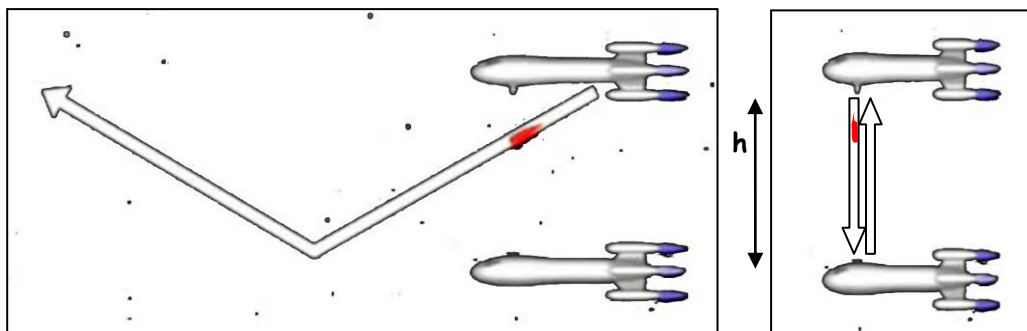
Einstein était un théoricien mais imaginait souvent des « expériences de pensée » pour illustrer ses propos. Il s'agit d'expériences imaginaires, parfaitement irréalisables, mais dont il est facile de deviner le résultat.

On envisage une première expérience de pensée qui permet d'illustrer la relativité du temps :

Deux navettes spatiales, côte à côte, distante d'une longueur h , parcourent la galaxie à une vitesse v proche de celle de la lumière. Dans la première navette, une impulsion LASER est envoyée vers la seconde qui dispose d'un miroir réfléchissant. Un observateur nommé « Mobile » dans la première navette mesure la durée mise par la lumière pour effectuer un aller-retour. Il la note Δt .

Un autre observateur nommé « Fixe » est placé, lui, sur un astéroïde proche des deux navettes. Il observe l'expérience réalisée et mesure la durée d'un aller-retour de la lumière. Il obtient une valeur notée $\Delta t'$.

Pour répondre aux questions suivantes, on pourra utiliser la vidéo en anglais ci-dessous et les deux illustrations suivantes issues de la vidéo :



2. On considère un aller-retour de la lumière. On suppose que la lumière se propage avec la célérité c constante.
 - a. Exprimer la durée Δt de ce parcours en fonction de la célérité c de la lumière et de la hauteur h .
 - b. Expliquer, en utilisant le postulat d'Einstein et sans faire de calcul, pourquoi la durée du parcours mesurée par « Fixe » est supérieure à celle mesurée par « Mobile ».

On va maintenant relier entre elles les durées mesurées par chacun des deux observateurs.

- c. On note d' la distance que la lumière a parcourue, du point de vue de « Fixe ». Exprimer d'^2 en fonction de h , v et $\Delta t'$ puis en fonction de c , v , Δt et $\Delta t'$.
- d. On combinant les résultats précédents, établir la relation :

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Exp. de pensée n°2



On envisage une seconde expérience de pensée grâce à la vidéo en anglais ci-contre.

3. Expliquer ce qu'illustre cette seconde expérience de pensée dans la théorie d'Einstein.

<http://bit.ly/VIDrelat>

3. Notion d'évènement

En relativité, les notions de position et de date ne sont donc pas indépendantes. On est amené à définir la notion essentielle d'évènement :

Un **évènement** est un phénomène instantané, repéré par une position et par une date, toutes deux relatives au référentiel d'étude. Un évènement est repéré dans l'espace spatio-temporel par les quatre coordonnées x, y, z et t .

4. Durée propre entre deux évènements

En conséquence, on définit les termes (introduits par Minkowski en 1908) :

- le **référentiel propre** comme le référentiel dans lequel deux événements sont localisés au même endroit.
- la **durée propre** comme la durée mesurée par l'horloge du référentiel propre.

La durée entre deux évènements mesurée dans un référentiel « impropre » est appelée durée impropre ou simplement **durée mesurée**.

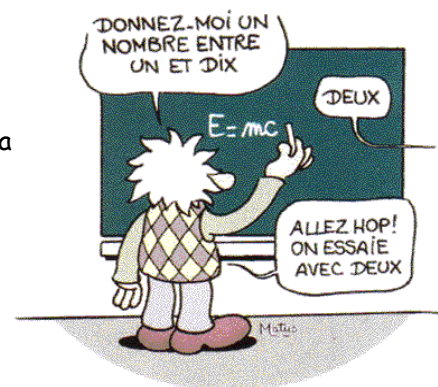
4. Dans la première expérience de pensée, quelle est la durée propre ? la durée mesurée ? Quelle est la durée qui est toujours la plus grande ?

5. Physique newtonienne ou relativiste ?

On va étudier maintenant dans quelle mesure la correction apportée par la relativité modifie le résultat des prévisions par rapport à la physique newtonienne.

Le facteur $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, appelé **facteur de Lorentz**, permet d'évaluer l'écart

entre la durée mesurée par une horloge embarquée (durée propre) et celle mesurée par une horloge immobile (dans un référentiel galiléen).



5. Calculer les valeurs de γ pour des horloges liées aux systèmes suivants :
 - a. un TGV qui avance à $300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au sol terrestre ;
 - b. l'Airbus A380, à la vitesse de $900 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au sol terrestre ;
 - c. la fusée Ariane 5, à la vitesse de $8000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au centre de la Terre ;
 - d. un proton sortant d'un accélérateur à une vitesse égale à 79% de celle de la lumière dans le vide ;
 - e. un proton sortant de l'accélérateur du LHC (Large Hadron Collider) à une vitesse égale à 99,9999991% de celle de la lumière dans le vide.
6. Exploiter les valeurs obtenues pour déterminer, parmi les situations évoquées, celle(s) qui appartiennent au champ de validité de la physique de Newton et celle(s) qui ne sont correctement interprétées que par la physique d'Einstein.
7.
 - a. À l'aide d'un tableur, tracer la courbe représentant γ en fonction de v , pour des valeurs de v comprises entre 0 et c .
 - b. Expliquer en quoi ce graphique permet de comprendre que, dans de très nombreuses situations, la mécanique de Newton reste pertinente.
 - c. D'après vos connaissances, citer quelques applications, dans la recherche scientifique ou dans la vie quotidienne, où une approche relativiste est indispensable pour interpréter correctement les observations.

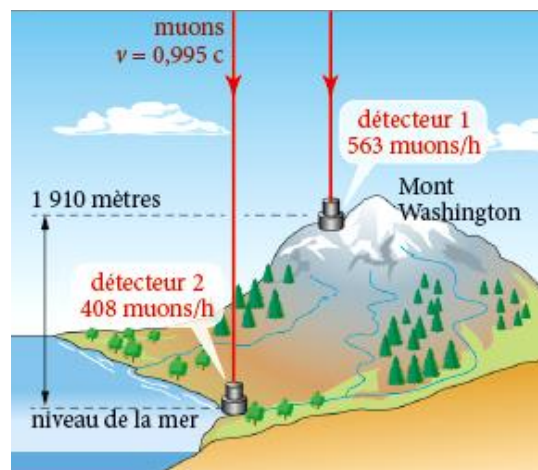
3 La relativité à l'épreuve de l'expérience : les muons à travers l'atmosphère

La théorie de la relativité du temps a été confirmée par de nombreuses expériences.

L'expérience suivante a été réalisée par B. Rossi et D.B. Hall en 1941 sur un dénivelé de 1624 m entre Echo Lake (3240 m) et Denver (1616 m), puis par D.H. Frisch et J.H. Smith en 1963 entre le sommet du Mont Washington (1910 m) et le niveau de la mer.

Donnée importante pour la compréhension du texte suivant : si on observe un grand nombre de particules instables et identiques dans un référentiel où elles sont immobiles, au bout d'une durée appelée demi-vie et notée $t_{1/2}$, il restera, en moyenne, la moitié de l'échantillon, l'autre moitié s'étant désintégrée.

Les muons sont des particules instables dont la demi-vie est $t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$. Ces muons sont produits abondamment par interaction entre le rayonnement cosmique et l'atmosphère.



Dans l'expérience de D.H. Frisch et J.H. Smith en 1963, un détecteur est réglé pour détecter les muons se déplaçant au voisinage d'une verticale par rapport à la Terre avec une vitesse moyenne $v = 0,995 c$. Ce détecteur est situé à 1910 mètres d'altitude et enregistre 563 ± 10 muons par heure. Le deuxième détecteur, identique, situé au niveau de la mer, enregistre 408 ± 9 muons par heure.

Mesurée dans le référentiel terrestre, la durée nécessaire pour qu'un muon parcoure une distance entre les deux détecteurs est $\Delta t_1 \approx 6,40 \mu\text{s}$, 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 une trentaine seulement au niveau de la mer.

8.
 - a. Que signifient les indications ± 10 et ± 9 associées au nombre de muons détectés ?
 - b. Retrouver par le calcul la durée Δt_1 indiquée dans le texte. Est-ce une durée propre ou une durée mesurée ?
 - c. En exploitant la donnée importante au-dessus du texte, justifier la prévision attendue d'une trentaine de muons au niveau de la mer et la comparer avec la valeur réellement mesurée.
 - d. En utilisant la relation entre durée propre et durée mesurée, montrer que la théorie de la relativité explique l'écart entre les prévisions et les mesures réelles du nombre de muons.
9. Rédiger une courte synthèse pour expliquer en quoi cette expérience valide la théorie de la relativité du temps.

La vidéo originale :



<http://bit.ly/VIDrelat>