

Animation

1. invariance de la lumière: cas des étoiles doubles
2. expérience de Michelson et Morley
3. principe de la relativité (M. Gastebois)

Table des matières

I) invariance de la célérité de la lumière

- 1) mesure d'une durée
- 2) loi de composition des vitesses
- 3) postulat d'Einstein

II) la relativité restreinte

- 1) différence entre physique classique et relativiste
- 2) la dilatation du temps!
- 3) conclusion: définition du temps propre et impropre
- 4) mon fils est plus vieux que moi!

Programme officiel

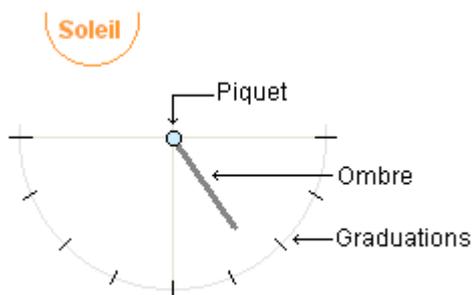
I) invariance de la célérité de la lumière

1) mesure d'une durée

Les phénomènes astronomiques, réguliers et facilement observables, ont donné à l'homme ses premiers repères dans le temps : le jour, le mois, l'année. Plusieurs siècles plus tard, ils ont appris à évaluer le temps en observant l'ombre d'un gnomon planté dans le sol ou grâce à un réservoir d'eau ou de sable gradué qui se vide régulièrement.

Dispositifs construits par l'homme :

- le cadran solaire :



Lorsqu'il est placé au soleil, l'ombre d'un piquet parcourt régulièrement les divisions du cadran solaire.

- sablier, **clepsydre** : Dans un sablier, la durée totale d'écoulement du sable est connue. Elle permet une mesure simple du temps. Une clepsydre est un récipient percé muni d'une graduation. L'écoulement du liquide ou du sable permet de mesurer le temps.

- les horloges: il en existe plusieurs types:

- **Les horloges mécaniques** qui apparaissent dès la fin du Moyen Age : le temps est mesuré grâce aux oscillations d'un balancier (pendule simple) dont on connaît la période.

- **Les horloges électriques** : le temps est mesuré grâce aux oscillations d'un cristal de quartz qui oscille à une fréquence $f = 32768 \text{ Hz}$.

- **Les horloges atomiques**: elles datent des années 50. Elles donnent l'heure à l'aide de la fréquence de rayonnement du césium 133.

La **seconde** est actuellement définie comme la **durée de 9 192 631 770 périodes** de la radiation émise au cours de la transition énergétique entre 2 niveaux d'énergie de l'atome de césium 133. Autrement dit **de 9 192 631 770 fois par seconde le césium émet ce rayonnement particulier.**



Horloge atomique commerciale à césium ayant servi à réaliser le temps légal français dans les années 1980 et comme référence pour l'horloge parlante (source wikipédia)

2) loi de composition des vitesses

Soit un train se déplaçant à une vitesse v_1 sur un rail rectiligne. Une personne se déplace à une vitesse v_2 dans le sens de déplacement du train. Dans le référentiel galiléen 'quai de la gare', la vitesse de déplacement de la personne est égale à la somme des deux vitesses:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

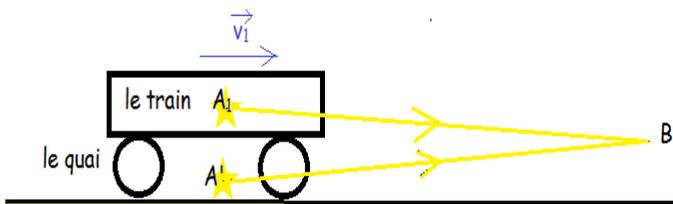
$$\|\vec{v}\| = \|\vec{v}_1 + \vec{v}_2\|$$

$$v = v_1 + v_2$$

Cette loi est appelée loi de composition des vitesses de Galilée.

Prenons l'exemple maintenant d'une personne fixe dans le train qui envoie un éclair lumineux à l'instant t_1 d'un point A_1 . Le train se déplace à une vitesse v_1 . Au même instant on envoie un éclair d'un point A' du quai de la gare. Un observateur est placé en un point B tel que $A_1B = A'B$. La célérité de la lumière est $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. L'observateur reçoit-il les éclairs en même temps? Eh oui à l'instant t_2 ! Cette constatation est-elle en accord avec la loi de composition des vitesses? Eh non. Pourquoi?

Si il y avait composition des vitesses alors la célérité de l'éclair lumineux dans le train serait: $v = v_1 + c > c$! L'observateur recevrait l'éclair envoyé du train avant celui envoyé du quai ($A'B = A_1B$). Ce n'est pas le cas.



Animation: invariance de la vitesse de la lumière dans le cas des étoiles doubles (Serge Bertorello)

3) postulat d'Einstein

Einstein en 1905 énonce le postulat de l'invariance de la célérité de la lumière:

La célérité de la lumière ne dépend pas du référentiel d'étude. Elle est la même dans tous les référentiels (dans le vide la célérité vaut $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

L'expérience de Morley et Michelson avait mis en évidence l'invariance de la célérité de la lumière. Qu'elle se propage dans la direction du mouvement de la Terre ou dans la direction perpendiculaire à celle-ci la célérité de la lumière est la même.

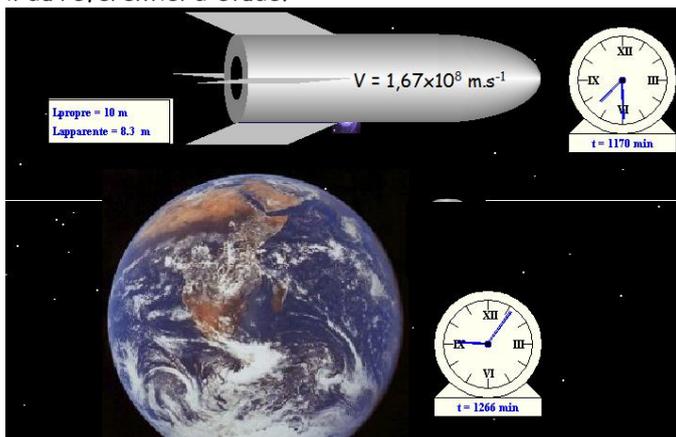
Animation: expérience de Michelson et Morley

II) la relativité restreinte

1) différence entre physique classique et relativiste

En physique classique le temps s'écoule de la même façon quelque soit le référentiel d'étude. Dans le référentiel 'train', en mouvement quand il s'écoule une seconde, il s'écoule également une seconde dans le référentiel quai du train.

Cliquer sur l'animation suivante 'principe de la relativité' (M. Gastebois). En relativité restreinte, le temps dépend-t-il du référentiel d'étude?



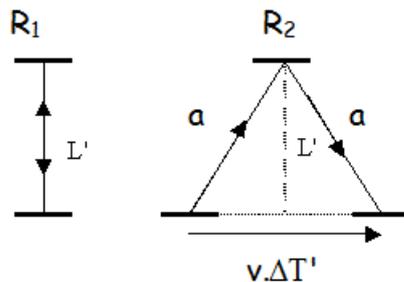
Selon la théorie de la relativité restreinte, l'écoulement du temps est relatif au référentiel d'étude

2) la dilatation du temps!

Un astronaute dans une fusée éclaire un miroir placé au-dessus de lui à une distance L' . Le référentiel R_1 (lié à la fusée) est supposé galiléen. On place une horloge dans ce référentiel. La durée mise par l'éclair pour parcourir un aller-retour entre le point d'émission et de réception du signal est:

$$c = \frac{2.L'}{\Delta T_0} \Rightarrow \Delta T_0 = \frac{2.L'}{c}$$

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1} : \text{célérité de la lumière}$$



ΔT_0 est appelé le **temps propre** car il est mesuré par une horloge placée dans le référentiel où se passe l'événement 'aller-retour de l'éclair'.

Plaçons-nous sur le référentiel terrestre. On considère que la fusée a un mouvement rectiligne uniforme par rapport au référentiel terrestre R_2 . Sa vitesse est notée v . Quelle est dans le référentiel terrestre R_2 , la durée $\Delta T'$ appelée **durée impropre ou durée mesurée** correspondant à l'événement 'aller-retour du flash'?

Durant cet événement, la fusée se déplace d'une distance $d = v \cdot \Delta T'$ par rapport au référentiel terrestre R_2 . L'éclair parcourt donc une distance $2.a$ avec, d'après le théorème de Pythagore:

$$a^2 = \left(\frac{v \cdot \Delta T'}{2}\right)^2 + L'^2$$

$$a = \sqrt{\left(\frac{v \cdot \Delta T'}{2}\right)^2 + L'^2}$$

$$2.a = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{v \cdot \Delta T'}{2}\right)^2 + L'^2}$$

On a vu précédemment l'invariance de la célérité de la lumière. Par conséquent, une horloge fixe posée sur la Terre mesurera une durée impropre de :

$$c = \frac{2.a}{\Delta T'} \Rightarrow \Delta T' = \frac{2.a}{c} \text{ avec}$$

$$\Delta T' = \frac{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{v \cdot \Delta T'}{2}\right)^2 + L'^2}}{c}$$

$$\Delta T'^2 = \frac{4 \cdot \left(\left(\frac{v \cdot \Delta T'}{2}\right)^2 + 4L'^2\right)}{c^2}$$

$$\Delta T'^2 = \frac{v^2 \cdot \Delta T'^2 + 4L'^2}{c^2} \text{ or}$$

$$\Delta T_0 = \frac{2.L'}{c} \Rightarrow 4L'^2 = c^2 \cdot \Delta T_0^2$$

$$\Delta T'^2 = \frac{v^2 \cdot \Delta T'^2 + c^2 \cdot \Delta T_0^2}{c^2}$$

$$\Delta T'^2 - \frac{v^2}{c^2} \Delta T'^2 = \Delta T_0^2$$

$$\Delta T'^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \Delta T_0^2$$

$$\Delta T' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta T_0$$

$\Delta T' > \Delta T_0$. Il s'écoule plus de temps sur la Terre que dans la fusée: on observe une **dilatation du temps dans le référentiel fusée!**

3) conclusion: définition du temps propre et impropre

Le temps propre ou durée propre ΔT_0 est la durée d'un événement mesurée par une horloge. Cette horloge fixe est placée dans le référentiel galiléen où se déroule l'événement.

Le temps ou durée impropre $\Delta T'$ est la durée d'un événement mesurée dans un référentiel autre que celui où se déroule l'événement.

ΔT_0 et $\Delta T'$ sont liés par la relation suivante:

$$\Delta T' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta T_0 = \gamma \Delta T_0$$

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

Dans le cas où v est faible devant c on peut négliger cette dilatation du temps. Le temps propre est peu différent du temps impropre. La mécanique classique et relativiste se rejoignent

Ce phénomène de dilatation du temps a été observé dans les satellites GPS. Les horloges embarquées dans le satellite sont retardées, il faut les synchroniser avec celle sur Terre.

4) mon fils est plus vieux que moi!

Un astronaute Bob de 32 ans part en voyage dans une fusée avec une vitesse $v = 0,99.c$ dans l'espace. Il laisse une femme et un enfant de 10 ans, le petit Pierre. Il s'écoule une durée propre $\Delta T_0 = 5,0$ ans avant que Bob ne revienne sur Terre. Quelle durée impropre $\Delta T'$ s'est écoulée sur Terre? Quel est alors l'âge de Pierre?

$$\Delta T' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta T_0$$

$$\Delta T' = \left(1 - \frac{(0,99.c)^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \Delta T_0 = 35 \text{ ans}$$

Au retour de Bob, Pierre à $10 + 35 = 45$ ans. Bob à $32 + 5 = 37$ ans, il est plus jeune que Pierre. (Bob doit changer de femme).

Programme officiel

Comprendre: Lois et modèles

Comment exploite-t-on des phénomènes périodiques pour accéder à la mesure du temps? En quoi le concept de temps joue-t-il un rôle essentiel dans la relativité? Quels paramètres influencent l'évolution chimique? Comment la structure des molécules permet-elle d'interpréter leurs propriétés? Comment les réactions en chimie organique et celles par échange de proton participent-elles de la transformation de la matière? Comment s'effectuent les transferts d'énergie à différentes échelles? Comment se manifeste la réalité quantique, notamment pour la lumière?

Temps, mouvement et évolution

| Notions et contenus | Compétences exigibles |
|--|---|
| Temps et relativité restreinte Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps. | Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens. |
| Postulat d'Einstein. Tests expérimentaux de l'invariance de la vitesse de la lumière. | Définir la notion de temps propre. Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée. |
| Notion d'événement. Temps propre. Dilatation des durées. Preuves expérimentales. | Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte. |