Chapitre 12 Temps et relativité restreinte

I Composition des vitesses en physique classique

1. Rappel

Je marche à 5km/h vers l'avant dans un tgv qui avance à 300 km/h. Ma vitesse est donc de 305 km/h par rapport au sol (référentiel). On a donc : $v_{moi/sol}=v_{moi/tgv}+v_{tgv/sol}$

*Un **référentiel** est l'objet par rapport auquel on décrit le mouvement.*

Je marche à 5 km/h vers l'arrière dans un tgv qui avance à 300 km/h. Ma vitesse est donc de 295 km/h par rapport au sol. On a donc : $v_{moi/sol}=v_{tgv/sol}-v_{moi/tgv}$

Conclusion : la vitesse se compose c'est-à-dire qu'on a en physique classique la relation :

$$\boxed{\vec{v}_{A/R}=\vec{v}_{A/R'}+\vec{v}_{R'/R}}$$

R et R' étant 2 référentiels

Une voiture (folle) qui roule à contre sens à 100 km/h sur l'autoroute et qui percute une autre voiture (normale) allant à 120 km/h a une vitesse de 220 km/h par rapport à la voiture normale car :

$$\vec{v}_{folle/normale}=\vec{v}_{folle/route}+\vec{v}_{route/normale}$$

soit

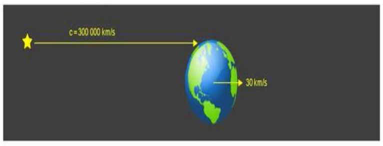
$v_{folle/normale} = v_{folle/route} + v_{route/normale} = 100 + 120 = 220\ km.h^{-1}$

2. La composition des vitesses s'applique-t-elle à la lumière ?

Quelle est la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide ?

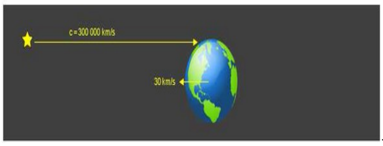
c=300 000 km/s

Soit les situations suivantes :
a) la Terre s'éloigne de l'étoile à la vitesse de 30 km/s
b) la Terre s'approche de l'étoile à la vitesse de 30 km/s



Quelle est la vitesse attendue de la lumière par rapport à la Terre dans le cas a) ?

$v_{lumière/Terre} = v_{lumière/etoile} - v_{Terre/étoile}$ donc 299 970 km/s

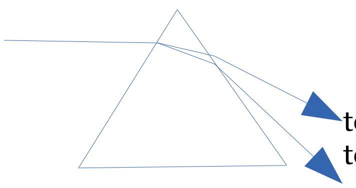


Quelle est la vitesse attendue de la lumière par rapport à la Terre dans le cas b) ?

$v_{lumière/Terre} = v_{lumière/etoile} + v_{Terre/étoile}$ donc 300 030 km/s

Les mesures d'Arago (1853) :

Le physicien français Arago a tenté de mesurer cette différence. Il a utilisé le principe suivant : il est possible de mesurer la vitesse de la lumière en mesurant sa déviation par un prisme.



Plus un rayon est rapide, moins il est dévié par le prisme.

Il ne mettra pas en évidence cette différence. La vitesse de la lumière est toujours de 300 000 km/s que ce soit par rapport au Soleil ou à la Terre ou tout autre référentiel galiléen.

*Conclusion : La vitesse de la lumière ne s'additionne pas ni ne se soustrait à d'autres vitesses lorsqu'on change de référentiel. C'est le postulat d'Einstein : **la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.***

II Conséquences du postulat d'Einsten

1. La dilatation des durées

Le temps ne s'écoule pas de la même façon pour un observateur en mouvement et un observateur immobile ceci pour être en accord avec le postulat d'Einstein.

Exemple : exercice ci-contre

1. C'est O_1 car il est immobile par rapport au phénomène mesuré.

*La **durée propre** ΔT_0 est la durée entre 2 événements mesurée par une horloge qui est immobile par rapport à ces 2 événements.*

*$\Delta T'$ est la **durée mesurée** par une horloge en mouvement par rapport aux événements observés.*

2.a. Pour O_1, la distance parcourue par la lumière lors d'un aller-retour entre les deux miroirs est :

$$d_{lumière} = 2L$$

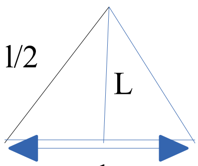
b. La lumière parcourt 2L en une durée ΔT_0 à la vitesse c donc :

$$2L = c.\Delta T_0$$

3.a. Pendant un aller retour, l'astronef a parcouru :

$$d = v.\,\Delta T'$$

b.



c. La relation est : $\left(\frac{d}{2}\right)^2 + L^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2$

4.a. $l = c \cdot \Delta T'$

b. Dans l'expression du 3.c, on remplace d, L et l par leur expression :

$$c^2.(\Delta T'/2)^2 = v^2.(\Delta T'/2)^2 + c^2.(\Delta T_0/2)^2$$

$$(\Delta T'/2)^2.(c^2-v^2) = c^2.(\Delta T_0/2)^2$$

$$\frac{\Delta T'}{2} = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}} \times \frac{\Delta T_0}{2} \quad \text{soit :} \quad \Delta T' = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}} \times \Delta T_0$$

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

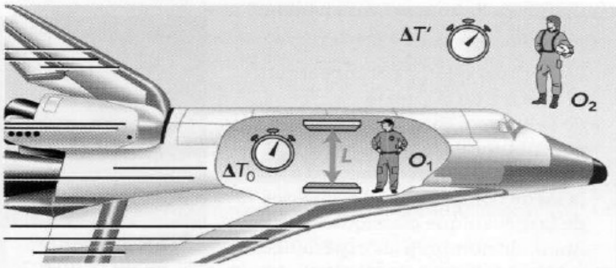
5. c > v puisque c est la plus grande vitesse possible donc γ est >1 donc $\Delta T' > \Delta T_0$ donc l'événement mesuré par O_2 semble plus long .

Conclusion :

Le temps ne s'écoule pas de la même façon pour les 2 observateurs :

La relativité restreinte conduit à des conclusions surprenantes dont celle de la dilatation des durées. L'expérience de pensée suivante permet de démontrer la formule de dilatation des durées et l'expression du coefficient γ.

Elle utilise une « horloge de lumière » qui est un dispositif imaginaire constitué de deux miroirs parallèles (représentés en bleu dans le schéma ci-dessous) entre lesquels les allers-retours d'un faisceau lumineux rythment le temps.



Dans un vaisseau, un observateur O_1, immobile par rapport à l'horloge de lumière, mesure la durée ΔT_0 d'un aller-retour de la lumière entre les deux miroirs distants d'une longueur L. La lumière se déplace à une vitesse de valeur c.

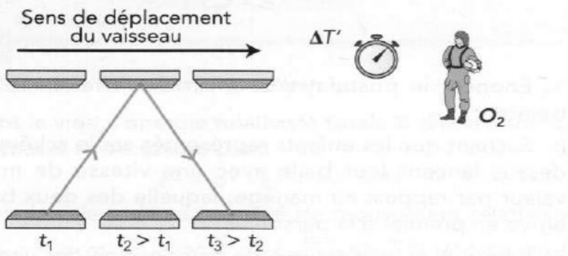
Un autre observateur O_2, à l'extérieur du vaisseau, regarde l'horloge et la voit se déplacer horizontalement à une vitesse de valeur v constante. Dans le référentiel galiléen lié à O_2, le faisceau de lumière parcourt une distance plus grande que celle parcourue dans le référentiel galiléen relié à O_1 du fait du déplacement du vaisseau (schéma ci-dessus).

La lumière ayant une vitesse de valeur c indépendante du référentiel, la durée $\Delta T'$ mesurée par O_2 sera supérieure à ΔT_0.

1. Lequel des observateurs mesure la durée propre ?

2. a. Pour O_1, quelle est la distance parcourue par la lumière lors d'un aller-retour entre les deux miroirs ?
b. Exprimer cette distance en fonction de c et de ΔT_0.

3. a. Sur le schéma ci-dessous, on a représenté différentes positions de l'horloge observée par O_2 lors d'un aller-retour de la lumière entre les deux miroirs.



b. On appelle ℓ la distance parcourue par la lumière dans le référentiel lié à O_2 pendant la durée $\Delta T'$.
Recopier et compléter le schéma de la question 3a en faisant apparaître d, L et $\frac{\ell}{2}$.
c. Quelle est la relation entre d, L et ℓ ?

4. a. Exprimer la distance ℓ en fonction de c et de $\Delta T'$.
b. À l'aide des questions précédentes, exprimer la durée $\Delta T'$ en fonction de ΔT_0 et montrer que le coefficient γ apparaissant vaut :

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

5. Pourquoi parle-t-on de dilatation des durées dans le titre de l'exercice ?

une horloge en mouvement bat plus lentement qu'une horloge immobile. $\Delta T' > \Delta T_o$. C'est le phénomène de dilatation des durées.

2) La contraction des longueurs

La longueur d'un objet dépend de sa vitesse par rapport à l'observateur. On observe la contraction des longueurs pour un objet en mouvement par rapport à un observateur.

$v = L_o/\Delta T_o = L'/\Delta T'$ donc $L_o = L'/\gamma$ donc L_o est plus petit que L'.

III Quand doit-on utiliser la relativité restreinte ?

1. Pour le GPS

Les satellites GPS se déplacent avec une vitesse de 3,9 km/s. C'est infime par rapport à la vitesse de la lumière mais cela suffit à ce que leurs horloges retardent de 7 microsecondes par jour par rapport aux horloges terrestres à cause de la relativité restreinte (un autre décalage apparaît à cause de la différence de gravitation).

2. Désintégration des muons

Les muons sont des particules créées dans la haute atmosphère terrestre **à 20 km de hauteur**, lors de la collision de protons avec les atomes de l'atmosphère. Les muons sont très instables : leur durée de vie propre ΔT_o est 2,2 µs. Ils se déplacent à une vitesse de 0,9997.c

En physique classique, la distance parcourue par les muons devraient être :

$d = 0{,}9997 \times 300\,000\,000 \times 2{,}2 \times 10^{-6} = 659\,m$ et donc **ils ne devraient pas être détectés au sol**.

Pourtant ces muons sont détectés au niveau du sol. Leur durée de vie pour un observateur terrestre est plus longue : on la calcule avec la formule relativiste de la dilatation des temps :

$$\Delta T' = \Delta T_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 2{,}2 / \sqrt{1 - 0{,}9997^2} = 89{,}8\,\mu s$$

soit une durée environ 40 fois plus grande et donc une distance d'environ 26 km ce qui rend tout à fait possible la détection au sol des muons produits dans la haute atmosphère.

---

p : 220 n°15 : Une période variable. **Raisonner ; calculer.**

On imagine qu'une fusée se déplace selon une trajectoire rectiligne avec une vitesse de valeur constante v = 250 000 km.s^{-1} par rapport à la Terre.

À son bord, un astronaute envoie à un ami resté sur Terre un signal lumineux périodique. Il règle sa fréquence d'émission f à 5,0 Hz.

Le référentiel terrestre et celui lié à la fusée sont supposés galiléens pendant la durée des mesures.

Données : Les durées propre ΔT_o et mesurée $\Delta T'$ sont reliées par $\Delta T' = \gamma.\Delta T_o$, où: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ avec v la valeur de la vitesse relative des horloges qui mesurent $\Delta T'$ et ΔT_o et c = 3,00 x 10^8 m.s^{-1}.

1. Quels sont les deux événements à considérer pour étudier la période du signal lumineux envoyé par l'astronaute à son ami ?
2. Quelle est la période propre de ce signal lumineux ?
3. Quelle est la période mesurée de ce signal par l'ami resté sur Terre ?

1. Les deux événements à considérer pour étudier la période d'un signal lumineux sont les émissions consécutives de deux signaux lumineux.
2. Les 2 évènements ont lieu au même endroit dans le référentiel de la fusée.
   C'est donc l'astronaute qui mesure une durée propre ΔT_0.
   La période propre de ce signal lumineux est celle mesurée à bord de la fusée : $\Delta T_0 = \frac{1}{f} = \frac{1}{5{,}0} = 0{,}20$ s.

3. La période mesurée $\Delta T'$ par l'ami resté sur Terre est :

$\Delta T' = \gamma\, \Delta T_o$ avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ soit $\Delta T' = \frac{0{,}20}{\sqrt{1-\frac{(250\,000 \times 10^3)^2}{(3{,}00 \times 10^8)^2}}} = 0{,}36$ s.

$\Delta T' > \Delta T_0$: phénomène de « dilatation des durées ».