

Compétences

Voici les concepts que vous devez acquérir à l'issue de ce chapitre :

- La célérité de la lumière est constante, quel que soit le référentiel galiléen considéré ;
- La durée d'un événement dépend du référentiel adopté pour le décrire ; on dit que le temps est « relatif » au référentiel ;
- La mécanique « classique » doit être remplacée par une nouvelle théorie.

1 La mécanique classique

1.1 Le temps, une notion absolue

La physique classique suppose que le temps s'écoule uniformément dans tous les référentiels. En particulier, deux événements qui sont simultanés dans un référentiel, le sont dans tous les autres.

Définition

En physique classique, la mesure du temps avec une horloge ne dépend pas du référentiel où s'effectue la mesure : le temps est absolu.

1.2 La vitesse, une notion relative

Exemple

Considérons un quai de gare, un train en mouvement par rapport à ce quai avec une vitesse \vec{v}_{train} , et un passager se déplaçant dans le train dans le même sens que celui-ci avec une vitesse $\vec{v}_{\text{passager}}$.

La loi de la composition des vitesses, lié au caractère absolu du temps, nous indique que la vitesse \vec{v} du passager par rapport au quai est telle que :

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{train}} + \vec{v}_{\text{passager}}$$

Définition

En mécanique classique, la vitesse d'un objet dépend du référentiel utilisé pour décrire le mouvement : le mouvement est dit relatif au référentiel.

On parle de relativité galiléenne, car c'est GALILÉE qui le premier l'a correctement décrite.

1.3 La relativité de la vitesse mise en défaut

La toute première expérience infirmant la relativité de la vitesse est l'expérience d'ARAGO. Elle consiste à mesurer la vitesse de la lumière venant d'étoiles :

- le matin à 6 h, quand on observe une étoile au zénith, la Terre s'en approche, on devrait mesurer $c + V$, où V est la vitesse de rotation de la Terre autour du Soleil ;
- le soir à 18 h, quand on observe une étoile au zénith, la Terre s'en éloigne, on devrait mesurer $c - V$.

Or il trouve la même vitesse de la lumière dans les deux cas.

Cette première expérience négative ouvrira la voie à la théorie de la relativité.

2 La mécanique relativiste

2.1 Le postulat d'Einstein : la vitesse, une notion absolue

Albert EINSTEIN (1879–1955), physicien allemand puis suisse puis helvético-américain, développe sa théorie de la relativité restreinte, basée sur l'invariance de la célérité de la lumière.

Définition

La célérité de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels.

2.2 Une vérification expérimentale du postulat d'Einstein : l'expérience d'Alväger

✎ Voir l'exercice 19.7 pour une description de cette expérience.

Grâce à cette expérience, ALVÄGER, physicien suédois, montre que la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse de la source avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-4} .

2.3 Quelques définitions

2.3.1 Notion d'évènement

Définition

Un événement est un phénomène objectif observable : « quelque chose se passe » (un flash de lumière, un éclair, une explosion, etc.)

Remarque

Beaucoup d'ambiguïtés résultent d'une définition imprécise de l'évènement étudié.

2.3.2 Repérer un évènement

Pour repérer un événement, il convient de se donner un référentiel. On peut alors imaginer un réseau tridimensionnel de règles et mailler ainsi l'espace. Dans chaque cellule ainsi définie, on place une horloge et toutes les horloges sont parfaitement synchronisées.

Définition

Un événement est un phénomène instantané, repéré par une position et une date, toutes les deux relatives au référentiel d'étude.

Un événement est repéré par ses coordonnées spatio-temporelles, ou coordonnées d'espace-temps (4 composantes).

2.3.3 Notion de temps propre

Le terme « temps propre » a été introduit par MIN-KOWSKI en 1908.

Définitions

- Si on considère deux événements, on appelle leur référentiel propre le référentiel dans lequel ces deux événements sont localisés au même endroit.
- La durée propre entre deux événements est la durée mesurée par l'horloge du référentiel propre.

Exemple

Exemple de la désintégration d'un muon : la durée propre de la vie d'un muon est celle qui est mesurée dans le référentiel où les événements « naissance du muon » et « désintégration du muon » sont au même endroit, c'est-à-dire dans le référentiel du muon.

3 Conséquence du postulat d'Einstein : la dilatation du temps

3.1 Durée impropre et dilatation des durées

Si la durée entre deux événements est mesurée dans un référentiel impropre (dans lequel les deux événements n'ont pas lieu au même endroit), on l'appelle « durée impropre ».

Définition

La durée impropre entre deux événements est toujours supérieure à la durée propre.

On parle alors de dilatation des durées.

3.2 Relation entre durée propre et durée mesurée dans un référentiel impropre

Si le référentiel impropre est galiléen et si le référentiel propre est en mouvement à vitesse constante par rapport à lui, alors la durée mesurée dans le référentiel impropre vaut :

Définition

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Δt_p durée propre entre les deux événements considérés ;

Δt_m durée impropre mesurée dans un référentiel galiléen ;

v valeur de la vitesse du référentiel propre par rapport au référentiel impropre galiléen.

On définit parfois le *facteur de LORENTZ* :

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

Le facteur de LORENTZ permet d'évaluer l'écart relatif entre les prévisions classique et relativiste de la durée entre deux événements :

- On remarque que le facteur de LORENTZ est très proche de **1** si la vitesse v est très inférieure à c , c'est-à-dire dans la plupart des situations classiques. Dans ces cas la physique de NEWTON ou physique « classique » reste valide, la correction apportée par la relativité restreinte est négligeable.
- Par contre, plus la vitesse v s'approche de c , plus le facteur de LORENTZ **augmente** : dans ces cas la relativité devient le seul cadre théorique valide.

Définition

$$\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p$$

Exercices du chapitre 19

 Exercices « de base », à aborder en priorité : du **19.1** au **19.4** inclu + **19.10**.

19.1 Temps de vie du muon

Les muons sont des particules produites dans la haute atmosphère par des rayons cosmiques rencontrant les premières molécules constituant l'atmosphère terrestre.

La vitesse d'un muon est $v = 0,999 \cdot c$, et sa durée de vie propre vaut en moyenne $\Delta\tau = 2,2 \mu\text{s}$.

1. Si les durées étaient invariantes par changement de référentiel galiléen, quelle distance serait parcourue par un muon durant sa vie dans le référentiel terrestre ? Serait-il alors possible de détecter un muon atmosphérique au niveau du sol ?
 2. Quelle est la durée de vie Δt d'un muon, mesurée dans le référentiel terrestre ? En déduire la distance réellement parcourue par le muon dans le référentiel terrestre.
- Conclusion.

19.2 N° 10 p. 253 – La dilatation des durées

19.3 N° 15 p. 253 – Coefficient γ et vitesse v

19.4 Mouvement d'un astronaute

On imagine que, dans un futur lointain, un astronaute puisse se déplacer suivant une trajectoire rectiligne à une vitesse de valeur constante par rapport à la Terre égale à $0,80 \times c$.



Le référentiel lié à l'astronaute est supposé galiléen. On considère deux événements se déroulant au même endroit sur Terre.

La durée propre ΔT_0 séparant ces deux événements est mesurée par une horloge liée à la Terre et proche du lieu où se déroulent ces événements.

1. De quel coefficient γ la durée $\Delta T'$ entre ces deux événements mesurée par l'astronaute est-elle allongée par rapport à la durée propre relevée sur Terre ?

2. Quelle devrait être la valeur de la vitesse de l'astronaute par rapport à la Terre pour que la durée *impropre* qu'il mesure soit le double par rapport à la durée propre sur Terre ?

19.5 N° 29 p. 257 – Particule instable

En cas de difficulté, abordez en premier l'exercice résolu n° 18 p. 254.

19.6 N° 27 p. 257 – Énergie cinétique

19.7 Le test des pions

Une théorie n'étant vraie que jusqu'à preuve du contraire, nombre d'expériences ont été menées pour tester celle de la relativité restreinte. Elle postule que la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est la même, quel que soit le référentiel galiléen, contrairement au résultat de la loi de composition des vitesses de la mécanique classique.

En 1964, ALVÄGER et ses collaborateurs ont mis au point un protocole faisant appel à des particules subatomiques de la famille des mésons : les pions neutres π^0 .

Ces particules peuvent être produites, dans un accélérateur de particules où règne le vide, lors de collisions de protons sur des atomes de béryllium. Les pions neutres se désintègrent ensuite, le plus souvent en émettant des photons gamma. En mesurant le « temps de vol » de ces photons entre deux points de repère, on détermine leur vitesse dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

On considère des pions neutres se déplaçant en ligne droite dans le vide à une vitesse constante de valeur $0,99975 \times c$ par rapport au référentiel terrestre (R) choisi.

1. Quelle est la source des photons gamma dans l'expérience d'ALVÄGER ?
2. À quelle vitesse dans (R) cette source se déplace-t-elle ?
3. Selon la loi classique de composition des vitesses, les vecteurs vitesse des photons dans le référentiel galiléen (R) et dans le référentiel lié à la source et supposé galiléen (R') sont liés par :

$$\vec{v}_{\text{photon/Terre}} = \vec{v}_{\text{photon/source}} + \vec{v}_{\text{source/Terre}}$$

3.a. Sachant que la lumière est émise avec une vitesse de valeur c dans le référentiel (R'), d'après cette loi, quelle serait la valeur de la vitesse dans le référentiel (R) de photons qui sont émis dans le sens du déplacement de la source ?

3.b. Même question pour des photons qui sont émis dans le sens opposé au sens de déplacement de la source.

4. Les résultats obtenus en 1964 montrent que la valeur de la vitesse des photons gamma dans le référentiel (R) est c , avec une incertitude de $10^{-5} \times c$.

4.a. En tenant compte de l'incertitude de mesure, la loi de composition des vitesses est-elle vérifiée par l'expérience d'ALVÄGER ?

4.b. La théorie de la relativité restreinte d'EINSTEIN est-elle confirmée par cette expérience ?



19.8 Survol d'un OVNI

On imagine qu'un OVNI est repéré dans le sud-ouest de la France. Il se déplace à une vitesse constante par rapport au sol dont la valeur est égale aux deux tiers de celle de la vitesse de la lumière dans le vide. On cherche à déterminer la durée qui s'écoule lors d'un survol rectiligne entre Bordeaux et Arcachon de l'OVNI, villes distantes de 49 km, lorsque cette durée est :

- mesurée par Nicolas en vacances à Arcachon ;
- mesurée par un extraterrestre à bord de l'OVNI.

Le référentiel terrestre et celui lié à l'OVNI sont supposés galiléens. Nicolas et l'OVNI sont immobiles respectivement dans ces référentiels.

- Quels sont les deux événements dont on cherche à mesurer la durée qui les sépare ?
- Qui de Nicolas ou de l'extraterrestre mesure la durée propre du survol de l'OVNI ?
- Calculer la durée du survol mesurée par Nicolas.
- Calculer la durée du survol mesurée par l'extraterrestre.

19.9 Les aventures de M. Tompkins

a. Lire l'ouvrage de Georges GAMOW « *Mr Tompkins in Wonderland* » :

<http://www.arvindguptatoys.com/arvindgupta/tompkins.pdf>

Notez précisément la taille de la bicyclette de M. TOMPKINS.

b. Réfléchir au fait que GAMOW aurait dû avoir un prix NOBEL, à une époque de la physique où il y avait tellement de découvertes à la minute qu'il est a été oublié. Mais pas par nous !

19.10 Un saut dans le temps de deux siècles

Voici un extrait de l'ouvrage « *L'Évolution de l'espace et du temps* » de Paul LANGEVIN, publié en 1911.

« Cette remarque fournit le moyen, à celui d'entre nous qui voudrait y consacrer deux années de sa vie, de savoir ce que sera la Terre dans deux cents ans, d'explorer l'avenir de la Terre en faisant dans la vie de celle-ci un saut en avant qui pour elle durera deux siècles et pour lui durera deux ans, mais ceci sans espoir de retour, sans possibilité de venir nous informer du résultat de son voyage puisque toute tentative du même genre ne pourrait que le transporter de plus en plus avant.

Il suffirait pour cela que notre voyageur consente à s'enfermer dans un projectile que la Terre lancerait avec une vitesse suffisamment voisine de celle de la lumière, quoique inférieure, ce qui est physiquement possible, en s'arrangeant pour qu'une rencontre, avec une étoile par exemple, se produise au bout d'une année de la vie du voyageur et le renvoie vers la Terre avec la même vitesse. Revenu à la Terre ayant vieilli de deux ans, il sortira de son arche et trouvera notre globe vieilli de deux cents ans si sa vitesse est restée dans l'intervalle inférieure d'un vingt-millième seulement à la vitesse de la lumière. Les faits expérimentaux les plus sûrement établis de la physique nous permettent d'affirmer qu'il en serait bien ainsi. »

https://fr.wikisource.org/wiki/L'Évolution_de_l'espace_et_du_temps

Vérifiez par un calcul la véracité des indications de M. LANGEVIN (avant de mener la vérification expérimentale, pensez à me chanter « *Adieu M. le Professeur* »!).