

LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

📖 *Le nom du livre, l'auteur*¹

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

➤ prérequis

Expériences

🔬 Biréfringence du quartz

Table des matières

1	Les fondements de la relativité restreinte	3
1.1	Limite de la mécanique newtonienne	3
1.2	Les postulats d'Einstein	4
1.3	Notion d'événement	5
1.4	Invariant et transformations relativistes	5
2	Conséquences cinématiques	6
2.1	Composition des vitesses	6
2.2	Perte de simultanéité absolue	6
2.3	Dilatation des durées et contraction des longueurs	7
2.4	Effet Doppler relativiste	8

Préparation

Placement : placement, garder en tête qu'il y a de la relativité en terminale S. On va prendre une approche plus formelle

Ressources : aller chercher ma grosse fiche de relat, la fiche de bb est bien pour la présentation

Biblio : Langlois, BFR, Pérez, Semay, BUP GAIDOT « Cinématique relativiste : une approche physique

Préparation : on peut faire un graphe python pour une détermination graphique dans l'expérience de Frisch et Smith

Questions : expérience de michelson-morley (principe, calcul, odg du décalage, cf fiche, wikipedia, compléments), mesures de c (cf. compléments) paradoxe des jumeaux (cf. compléments), apports de Poincaré, Lorentz, Einstein, Fitzgerald (cf. wiki et compléments), grandes lignes de la démo de l'invariance du carré de Minkowski (cf. Langlois, capturé)

Ressources Laura

- Animation expérience des muons, si elle fonctionne, la suivre pour l'explication <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressources-videos/relativite-restreinte/muon.swf/view>

Introduction

Les nuages de Kelvin En 1900, Lord Kelvin considérait devant la Royal Institution de Londres que la physique était quasiment comprise : In the clear blue sky of physics there remained on the horizon just two small clouds of incomprehension that obscured the beauty and clearness (La connaissance en physique est semblable à un grand ciel bleu, à l'horizon duquel subsistent seulement deux petits nuages d'incompréhension).

Les deux nuages Ces deux problèmes non résolus étaient

- celui du rayonnement du corps noir et de la catastrophe ultraviolette, qui va mener à la mécanique quantique.
- le mode de propagation de la lumière et la théorie de l'éther qui tente de lui attribuer un milieu de propagation et un référentiel privilégié. Les difficultés de la théorie de l'éther vont amener à de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. *On va développer ce point.*

Mécanique newtonienne La théorie de la mécanique newtonienne a été fondée dans la seconde partie du XVIIIe siècle, doit son succès à sa capacité d'interpréter et prédire de nombreux résultats à l'échelle humaine ou encore astronomique. Elle se base sur l'existence d'un temps absolu, indépendant de tout référentiel d'observation, et les lois de changement de référentiels inertiels sont basées sur les transformations de Galilée.

Electromagnétisme Toutefois, une autre théorie vit le jour au milieu du XIXe siècle, à savoir l'électromagnétisme de Maxwell. Des équations de Maxwell découlent les équations des ondes électromagnétiques, qui font apparaître une constante fondamentale c , qui correspond à la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide. [On rappelle l'équation de d'Alembert sur \$\vec{E}\$ et la valeur de \$c\$ fixée.](#) Or aucun référentiel n'est naturellement spécifié pour écrire les lois de Maxwell, alors que la cinématique galiléenne affirme que la vitesse de propagation de la lumière dépend du référentiel d'étude. Cela revient à dire que les équations de Maxwell ne sont pas invariantes par transformation de Galilée. *On pourrait montrer que les équations de Maxwell avec sources ne sont pas invariantes. Ici, on mentionne juste que le d'Alembertien est de manière évidente pas un invariant galiléen.*

Objectif On va montrer les insuffisances de la mécanique classique dans une première partie et la nécessité de fonder une mécanique relativiste. On va voir quelles propriétés en découlent, et quels en sont les conséquences. En mécanique newtonienne, les vitesses sont relatives aux observateurs et le temps est absolu. On va voir que la vitesse de la lumière est absolue mais les concepts de simultanéité vont être relatifs.

1 Les fondements de la relativité restreinte

1.1 Limite de la mécanique newtonienne

Ether Pour spécifier le référentiel où la vitesse de la lumière est égale à c , les physiciens ont donc supposé l'existence d'un milieu, appelé éther, dans lequel la lumière se propagerait. Le référentiel lié à l'éther serait celui où la vitesse de la lumière vaut c . Cependant, les expériences ayant pour but de mettre en évidence l'éther ont été confrontées à de sérieux problèmes, et la célérité de la lumière semblaient être invariante par changement de référentiel galiléen. C'est ce qu'illustre l'expérience de Fizeau, réalisée en 1851 et décrite ci-après. [On montre le schéma](#)

Expérience de Fizeau (1851) ↗ Langlois, wikipedia anglais (bon!), [lien vers la lettre de Fizeau, avec valeurs numériques](#)

L'expérience de Fizeau de 1851 consiste à faire interférer deux faisceaux lumineux passant par deux bras d'un circuit d'eau. Dans l'un des bras, l'eau circule à la vitesse $\vec{v} = v\vec{e}_x$, tandis que dans l'autre bras, l'eau circule à la vitesse $-\vec{v} = -v\vec{e}_x$. On considère un rayon (en vert) qui circule à contre-courant à l'aller et au retour. Le rayon bleu circule dans le sens du courant à l'aller et au retour. **ODG:** $L = 1.5m, V = 7m/s$. Fizeau utilise la lumière du Soleil, pour repérer facilement la frange centrale et utilise un aller-retour pour allonger le trajet compenser les différences de longueur, pression et température dans les bras. *Il a utilisé des tubes en verre de 5.3mm de diamètre, une pression de 2 bar*

Observations Fizeau a fait les observations suivantes :

- Lorsque l'eau est mise en mouvement, les franges sont déplacées, et, suivant que l'eau se meut dans un sens ou dans l'autre, le déplacement a lieu dans un sens ou l'autre.
- Les franges sont déplacées dans la direction du faisceau qui parcourt l'eau à contre-courant.
- En moyennant 19 mesures, Fresnel trouve pour $L = 1.487m, V = 7.069m/s$, un décalage de 0.23 frange pour le déplacement simple, ce qui donne 0,46 pour le déplacement double en renversant le sens de l'eau, la largeur d'une frange étant prise pour l'unité.

Interprétation Si l'éther n'est pas entraîné par l'eau, la vitesse de la lumière est c dans le référentiel de laboratoire. Les chemins sont équivalents, il n'y a pas de décalage de franges.

- l'éther est totalement entraîné par l'eau
- *Electromagnétisme+éther* : la lumière se propage à la célérité c/n dans le référentiel de l'éther $R_{\text{éther}}$
- *Mécanique newtonienne* : par composition galiléenne des vitesses, la lumière se propage à vitesse $c/n \pm v$ dans le référentiel du laboratoire R_{labo}

Ainsi, le retard entre les deux faisceaux est

$$\Delta t = 2L \left(\frac{1}{c/n - v} - \frac{1}{c/n + v} \right) \approx 4L \frac{n^2 v}{c^2}$$

. Fizeau mesure un décalage relatif Δp de franges en lumière blanche. En prenant une longueur d'onde moyenne de $\lambda = 500 \text{ nm}$, on obtient alors, avec $\delta = c\Delta t$ la différence de marche dans l'air :

$$\Delta p = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{c\Delta t}{\lambda} = \frac{4Ln^2v}{c\lambda}$$

Avec les paramètres de l'expérience de Fizeau et en prenant une longueur d'onde moyenne 500 nm, un indice de l'eau $n = 1.33$, on trouve : $\Delta p_{\text{classique}} = 0.49$ contre $\Delta p_{\text{exp}} = 0.23$. Les incertitudes ne sont pas données dans la lettre de Fizeau. Il y a désaccord.

Conclusion Pour notre leçon, on va interpréter ce résultat de la manière suivante (ce n'est pas l'interprétation historique de l'époque) : soit la composition des vitesses de Galilée, et donc les lois de la mécanique Newtonienne, soit les équations de Maxwell et donc les lois de l'électromagnétisme, sont fausses.

Interprétation historique A l'époque, l'expérience avait plutôt été interprétée, selon l'hypothèse de Fresnel, comme le fait que l'éther est partiellement entraîné par le déplacement de l'eau, avec un coefficient $\alpha = 1 - 1/n^2$, en accord numérique. Ce n'est pas à partir de l'expérience de Fizeau qu'on a commencé à douter de la mécanique newtonienne. Même si Fizeau n'était que partiellement satisfait de l'explication, il a fallu d'autres expériences, telles que celle de Michelson et Morley qui n'arrive pas à mettre en évidence de mouvement relatif entre la Terre et l'éther. Face à ces difficultés de la théorie de l'éther, il était à craindre que de nouvelles modifications tout aussi arbitraires ne doivent être apportées au gré des résultats expérimentaux et que l'électrodynamique ne finisse, comme la théorie astronomique des cycloïdes, en un corps raffiné de règles arbitraires qui décrivent correctement mais ne prédisent rien.

Difficultés philosophiques de l'éther Il existe aussi une difficulté philosophique grave avec l'introduction de l'éther. Les physiciens avaient mis plus de 20 siècles, entre Aristote et Copernic, pour comprendre que notre petite planète n'est pas le centre de l'univers. Le principe de relativité selon Galilée avait le mérite d'indiquer qu'aucun référentiel galiléen n'est particulièrement privilégié. L'introduction de l'éther devait briser cette "démocratie" des référentiels en introduisant un référentiel très particulier, celui de l'éther, le seul dans lequel les équations de Maxwell devaient s'appliquer. Ce genre d'argument a certainement joué un rôle essentiel pour Einstein.

Bonus : tentatives de réparation de la théorie de l'éther On pouvait, devant ce résultat négatif, adopter deux points de vue. Le premier était de tenter de "réparer" la théorie de l'éther. Si on ne pouvait décemment supposer que le référentiel absolu était celui de la terre (la révolution copernicienne était passée par là), on pouvait supposer que l'éther était entraîné au voisinage des corps massifs, une analogie évidente avec l'entraînement de la couche limite hydrodynamique. On pouvait aussi supposer, avec Lorentz, une "contraction" de la longueur des objets matériels dans la direction du mouvement, fondée sur une théorie électrostatique des interactions particules dans la matière. On pouvait supposer aussi un lien entre la vitesse de la lumière et celle de (les sources utilisées par Michelson étant liées à son appareil). Si de telles modifications "ad hoc" de l'électromagnétisme permettaient d'expliquer le résultat négatif de l'expérience de Michelson, ils constituaient pas un corps théorique cohérent. Il était à craindre que de nouvelles modifications tout aussi arbitraires ne doivent être apportées au gré des résultats expérimentaux et que l'électrodynamique ne finisse, comme la théorie astronomique des cycloïdes, en un corps raffiné de règles arbitraires qui décrivent correctement mais ne prédisent rien.

1.2 Les postulats d'Einstein

➤ BFR chap 13, 3.5

L'attitude qu'a eu Einstein, face au problème de l'éther, était très courageuse car elle conduit, comme on va le voir,

à mettre en cause des notions très fondamentales tel que la loi de composition des vitesses. Cela impliquait bien sur que la cinématique galiléenne était erronée, ou du moins, n'était qu'une approximation valide pour des vitesses petites devant celle de la lumière) et donc que toute la physique était à reconstruire (sauf, peut être, l'électrodynamique). En 1904, Einstein énonça les postulats de la relativité restreinte, qui sont au nombre de deux. De ces postulats découlent des conséquences qu'on a va comparer à l'expérience.

1. Les lois fondamentales de la physique sont invariantes par changement de référentiel inertiel.

Corollaire : Il s'agit en fait du principe de relativité galiléenne. Ce postulat suppose l'existence de tels référentiels, qui apparaissent alors comme privilégiés dans le mesure où l'écriture des lois de la physique y sont les mêmes. Il convient de remarquer que ce postulat est vide de sens tant que les lois fondamentales ne sont pas précisées.

2. Les équations de Maxwell sont des lois fondamentales de la physique.

Corollaires : La célérité de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels inertiels, égale à c . De plus, les transformations de Galilée et le Principe Fondamental de la Dynamique sont abandonnés, puisqu'incompatibles avec les lois de l'électromagnétisme.

1.3 Notion d'événement

➤ BFR chap. 13, 1.3, 1.2 et 5.2

Espace-temps L'existence d'une constante fondamentale homogène à une vitesse (c) implique que les grandeurs temps et espace sont bien plus intimement liées que ce qu'on imaginait jusqu'alors. Les coordonnées temps ct et espace x seront donc mises au même plan dans un espace à 4-dimensions appelé espace-temps, assimilé mathématiquement à $\mathbb{R}^4$

Événement On appelle événement un phénomène physique localisé précisément dans l'espace et dans le temps, caractérisé par ses coordonnées dans un référentiel R , regroupées dans un vecteur à 4 composantes (ct, x, y, z) . Exemple : je claques des mains, émission d'un photon.

Référentiel inertiel De plus, on rappelle la définition de référentiel (ou observateur) : c'est un ensemble de points de références à partir desquels on associe une origine O de l'espace et un système d'axe $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$, munie d'une horloge qui donne le temps t . Un référentiel est inertiel s'il vérifie le postulat 1.

Notation Soient deux observateurs inertiels O et O' de repères locaux respectifs $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ et $(\vec{e}'_x, \vec{e}'_y, \vec{e}'_z)$, comme illustré sur le [schema]. Soit de plus un événement M . On peut écrire ses coordonnées dans R et R' respectivement [notation].



Comment relier ces coordonnées ? On a vu que la transformation de Galilée est à abandonner.

1.4 Invariant et transformations relativistes

La recherche des transformations de coordonnées respectant les postulats de la RR se base sur la notion d'invariant (par changement de référentiel inertiel). Soient deux événements M_1 et M_2 dont les coordonnées respectives dans un référentiel inertiel (R) sont (ct_1, x_1) et (ct_2, x_2) . On peut montrer le schéma wiki.

Invariant en dynamique newtonienne On rappelle les transformations de Galilée au tableau. Il y a aussi les rotations de l'espace. En mécanique newtonienne, l'invariant est l'intervalle de temps $\Delta t = t_2 - t_1$. En effet, puisque le temps est absolu, dans un autre référentiel, Δt sera le même.

Invariant en relativité restreinte On a vu qu'il fallait coupler espace et temps. Pour un espace-temps homogène et un espace isotrope, i.e. il n'y a pas de position, axe ou temps privilégiés (ce n'est plus vrai en RG) et pour respecter les postulats, on admet la propriété que le carré relativiste (ou pseudo-norme de Minkowski) $\Delta s^2 = c^2(t_2 - t_1)^2 - (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2$ est un invariant relativiste : elle est invariante par changement de référentiel inertiel : $\Delta s^2 = \Delta s'^2$ si on exprime les coordonnées de M dans R' . On l'admet ici, mais cela peut se démontrer de principe plus généraux comme l'homogénéité et l'isotropie de l'espace et l'homogénéité du temps.

Justification de l'invariant Le d'Alembertien est aussi de la forme "c carré temps carré moins espace au carré". Comme on veut le conserver, on conserve le carré minkowskien.

Temps propre Lorsque $\Delta s^2 > 0$, on définit le temps propre $\tau = \sqrt{\Delta s^2}$. Physiquement, c'est le temps que mesure l'observateur inertiel pour qui l'événement 1 et 2 se passent au même endroit $\Delta x = 0$. Cet observateur n'existe que si

l'intervalle est de type temps.

Transformations de Lorentz Les transformations qui respectent les postulats, l'homogénéité de l'espace-temps (transformations linéaires) et l'isotropie de l'espace sont celles qui laissent le carré relativiste invariant. Parmi, elles on trouve les rotations de repère, qui laissent t et la norme $\vec{r}^2$ invariants. Ce sont des transformations présentes en mécanique classique, ce n'est pas propre à la RR.

Boost de Lorentz Des transformations spécifiques à la RR qui laissent Δs^2 sont les boost de Lorentz à la vitesse v . [donner la définition, introduire β, γ]. Vérifier que Δs^2 est conservé.

Remarques

- Les variables temps et espace se transforment de façon symétrique.
- On retrouve la loi de transformation de galilée lorsque $v \ll c$. **ODG**: avion de chasse se déplaçant à Mach 1 ($v_0 = 345 \text{ m/s}$). On calcule β, γ et calcule les limites galiléennes.

2 Conséquences cinématiques

2.1 Composition des vitesses

Objectif En physique galiléenne, la vitesse est une grandeur additive sous changement de référentiel inertiel. Or il a été vu que cette loi de composition est impossible en relativité restreinte puisque la célérité de la lumière est invariante. Le but de cette section est donc de dériver la loi de composition des vitesses en relativité, et de voir si c'est en accord avec l'expérience de Fizeau.

Calcul ∇ Langlois

Commentaires

- Contrairement à la transformation galiléenne, la partie orthogonale de la vitesses est également affectée
- L'invariance de c est bien respectée, parce que $v_{//} = c$ implique $v'_{//} = (c - v_0)/(1 - v_0/c) = c$ et $v'_\perp = 0$ (important). *Une vérification expérimentale de cet effet a été réalisée au CERN en 1964, en mesurant la vitesse de photons émis par la désintégration d'un pion se déplaçant lui-même à une vitesse très élevée.*
- La limite $v_{//}, v_0 \ll c$ redonne bien la transformation de galilée à l'ordre 1.
- *Bonus : ce qui s'additionne, ce sont les rapidités $\alpha = \tanh^{-1} \beta$.*

Retour sur l'expérience de Fizeau. ∇ Langlois. Encore une fois, il s'agit d'une victoire éclatante pour la relativité.

2.2 Perte de simultanéité absolue

Définition de la simultanéité On dit que deux événements M_1 et M_2 sont simultanés dans (R) inertiel si leur coordonnées temporelles dans (R) sont identiques.

Perte de simultanéité [calcul] Ainsi la notion de simultanéité est relative, car elle dépend du référentiel inertiel dans lequel elle est exprimée.

Préservation de la causalité, cône de lumière ∇ Hladik p67, en capture. Une conclusion trop hâtive serait d'affirmer que la causalité entre les événements 1 et 2 est également relative. Prenons un référentiel inertiel R où on choisit les origines tels que 1 est repéré par le 4-vecteur nul. On trace le cône de lumière associé à 1, dans R : c'est le lieu des événements pouvant être reliés à 1 par un rayon lumineux. Les coordonnées x, y, z, t des événements M vérifient donc l'équation :

$$c^2 t^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

Dans l'espace-temps à quatre dimensions, l'équation est celle d'un hypercône représentant le lieu des trajectoires des rayons lumineux issus de l'origine O . Afin de pouvoir visualiser une telle hypersurface et de mieux étudier ses propriétés, limitons nous aux événements pour lesquels $z = 0$. Considérant ct comme un paramètre, on obtient alors l'équation :

$$c^2 t^2 = x^2 + y^2$$

C'est l'équation d'une famille continue de cercles, centrés sur l'axe du temps, chaque cercle étant de rayon ct . On obtient l'équation d'un cône appelé cône de lumière. Son angle au sommet est de 90° ainsi qu'on le voit en considérant la projection de cette surface sur le plan (x, ct) , dont l'équation est :

$$ct = \pm x$$

Selon la valeur de Δs^2 , on distingue trois cas :

- Si $\Delta s^2 = 0$, les deux événements peuvent être reliés par un rayon lumineux. L'intervalle est dit du genre lumière.
- Si $\Delta s^2 < 0$, la partie spatiale de l'intervalle prédomine sur la partie temporelle. Il est dit du genre espace. Si c'est de genre espace, une entité (onde, particule...) doit nécessairement aller plus vite que la vitesse de la lumière pour communiquer entre les deux événements. Comme ce n'est pas possible, il ne peut y avoir de lien de causalité entre les deux événements.
- Si $\Delta s^2 > 0$, la partie temporelle de l'intervalle prédomine sur la partie spatiale. Il est dit du genre temps. Il n'y a pas besoin de dépasser la vitesse de la lumière pour communiquer entre ces deux événements : il peut y avoir une relation de cause à effet. On distingue le passé et le futur par rapport à cet événement.

Par suite de l'invariance de l'intervalle, il est remarquable que la propriété d'être du genre lumière, temps ou espace est indépendante du référentiel considéré ; c'est une propriété intrinsèque de l'intervalle. De plus, on ne peut pas changer la relation de (non-)causalité en prenant un autre référentiel inertiel. En effet, pour passer d'un événement du futur vers un événement du passé, par continuité il faut sortir du cône et donc il faudrait qu'au franchissement, $\Delta s^2 = 0$, ce qui est impossible par invariance de Δs^2 ! *Par contre, les notions de "avant" et "après" l'événement 1 pour les événements hors du cône de lumière de 1 sont relatifs au choix de référentiel..*

2.3 Dilatation des durées et contraction des longueurs

Temps propre Soit un observateur inertiel (R) muni d'une horloge qui émet dans tout l'espace un signal régulier tous les Δt_0 . Notons M_1 et M_2 les événements correspondants à l'émission de deux signaux successifs. Puisque l'horloge est placée à l'origine du repère, les composantes de $M_2 - M_1$ dans (R) sont $(c\Delta t_0, 0, 0, 0)$.

Dilatation du temps Si comme précédemment, (R_0) est en translation rectiligne uniforme à la vitesse $\vec{v}_0 = v_0 \vec{e}_x$, l'observateur placé en O' repère les battements de l'horloge avec des coordonnées données le boost de Lorentz. $\Delta'_t = \gamma \Delta t_0 > \Delta t_0$. C'est la dilatation des temps

Confirmation expérimentale : Rossi et Hall, repris par Frisch et Smith  Gourgoulhon, chap. 4, 3.1, [Article original](#) [Ordres de grandeur](#), [wikipedia](#) La vérification expérimentale de la dilatation des durées la plus frappante date de 1963 et est due à Frisch et Smith, qui reprennent plus quantitativement les expériences de Rossi et Hall de 1941. Elle consista à déterminer le temps de vie des muons émis par la haute atmosphère.

Production de muons dans la haute atmosphère L'atmosphère reçoit des particules, notamment des protons (87%), qu'on appelle rayonnement primaire. Les collisions entre le rayonnement primaire et les atomes de l'atmosphère produisent des muons qui se dirigent vers la terre à une vitesse relativiste $\sim 0.9950c$ soit $\gamma \sim 8$. Un muon est une particule élémentaire du modèle standard, 207 fois plus lourde qu'un électron mais avec des propriétés similaires. *C'est le cousin lourd de l'électron*. C'est une particule instable de durée de vie moyenne d'environ 1 microseconde $\tau_0 = 2.2 \cdot 10^{-6} s$ dans le référentiel propre. Une particule instable se désintègre en électron + un neutrino muonique + un anti-neutrino électronique. On détecte un muon via un "scintillateur" : les muons arrivent dans un "cristal scintillant", ce qui freine le muon et fait exciter les molécules du cristal, qui se dés excitent en émettant des photons, qu'on détecte avec un photo-multiplicateur. *Ils ont utilisé du polystyrène dopé*.

Observations et mesures Frisch et Smith (1963) ont pu obtenir des résultats plus quantitatifs que Rossi et Hall (1941). Ils ont sélectionné les muons dont la vitesse est comprise entre $0.9950c$ et $0.9954c$, de facteur de Lorentz théorique $\gamma = 8 \pm 2$. Ils ont mesuré les flux de muons au sommet du mont Washington $\phi(z_1)$ et au niveau de la mer $\phi(z_1 + \Delta z)$, soit un dénivelé de $\Delta z = 1910m$, avec Oz vers le centre de la Terre. La loi de désintégration donne, si τ est durée de vie moyenne d'un muon et qu'un muon se déplacé à $v \sim 0.9950c$ dans le référentiel terrestre

$$\phi(z_1 + \Delta z) = \phi(z_1) \exp\left(\frac{-\Delta z/v}{\tau}\right)$$

En mesurant, $\phi(z_1) = 563$ muons/h, $\phi(z_1 + \Delta z) = 408$ muons/h, en sélectionnant des muons de facteur $\gamma = 8 \pm 2$, ils remontent à la durée de vie. Un raisonnement classique donne $\tau = \tau_0 = 2.2 \cdot 10^{-6} s$. Or, ils ont trouvé une durée de vie plus grande que τ , de $\tau = (8.8 \pm 0.8)\tau_0$, en accord avec le facteur de Lorentz théorique $\gamma = 8 \pm 2$.

Bonus : muographie/tomographi de muons  **Vidéo CEA** On peut utiliser les muons, assez pénétrants dans la matière, pour faire de l'imagerie. La mesure de l'atténuation du flux de muons permet de cartographier la densité d'un objet. On l'utilise en volcanographie ou pour sonder les pyramides.

Confirmation expérimentale : Hafele et Keating (bonus) L'expérience des horloges embarquées de, Hafele et Keating confirme le paradoxe des jumeaux.

Contraction des longueurs Uniquement dans la direction longitudinale. C'est le cas réciproque de la dilatation des temps, pour garder c constant. (TD ?). *Observation expérimentale : (i) on peut interpréter l'expérience de désintégration des muons comme la contraction de l'atmosphère dans le référentiel propre des muons. (ii) Heavy ions that are spherical when at rest should assume the form of "pancakes" or flat disks when traveling nearly at the speed of light. And in fact, the results obtained from particle collisions can only be explained when the increased nucleon density due to length contraction is considered. (iii) In synchrotrons and free-electron lasers, relativistic electrons were injected into an undulator, so that synchrotron radiation is generated. In the proper frame of the electrons, the undulator is contracted which leads to an increased radiation frequency. Additionally, to find out the frequency as measured in the laboratory frame, one has to apply the relativistic Doppler effect. So, only with the aid of length contraction and the relativistic Doppler effect, the extremely small wavelength of undulator radiation can be explained.*

2.4 Effet Doppler relativiste

Position du problème [schéma]

Calcul

Commentaires

- Effet Doppler transverse non présent en dynamique newtonienne.
- Correction d'ordre > 2 comparé à la formule classique.

Mise en évidence  **Wiki EN, Wiki Ives et Stillwell** Il a été mis en évidence par Ives et Stillwell entre 1938 et 1941, en étudiant le spectre de la lumière émise par des atomes d'hydrogènes se déplaçant à grande vitesse. Plus tard, il a été mis en évidence dans les accélérateurs de particules en regardant à angle droit des faisceaux de particules haute énergie.

Application GPS.

Conclusion

La théorie de la relativité restreinte a confirmée les lois de Maxwell tout en montrant que la cinématique galiléenne n'est qu'une limite à faible vitesse des lois fondamentales de la physique.

La relativité prévoit de nombreux phénomènes contre-intuitifs qui ont pourtant été démontré expérimentalement de façon éclatante. Il s'agit aujourd'hui d'un cadre théorique de base en physique fondamentale.

Ouverture : La dilatation des temps donne que l'intégrale du temps propre entre deux événements est maximale pour une horloge immobile, une propriété qui nous sera fort utile pour formuler un principe variationnel pour la dynamique relativiste. Bien que la cinématique ait été discutée, nous n'avons pas encore parlé des lois de la dynamique, puisque les lois de Newton doivent être modifiées. Ceci fera l'objet d'une prochaine leçon.

Compléments/Questions

Muons (culture) Le muon est, selon le modèle standard de la physique des particules, une particule élémentaire de charge électrique négative. Le muon a pour spin $1/2$ et a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mis à part sa masse, 207 fois plus grande (c'est pour cela qu'on l'appelle parfois "électron lourd"). Les muons sont des fermions de la famille des leptons, comme les électrons et les taus. Les muons sont notés μ^- . L'antimuon, l'antiparticule associée au muon, est notée μ^+ et est chargée positivement.

Sur Terre, les muons sont produits par la désintégration de pions chargés. Les pions sont créés dans la haute atmosphère par l'action des rayons cosmiques. Les muons ont une durée de vie faible (environ deux microsecondes). Cependant, les muons ont une grande énergie, ainsi l'effet de dilatation temporelle décrite par la relativité restreinte les rend observables à la surface de la Terre.

Tout comme il existe un neutrino-électron associé à l'électron, il existe un neutrino muonique qui est associé au muon.

Les muons sont très pénétrants, on les utilise pour l'imagerie, par tomographie de muons.

Avancée du périhélie de Mercure La trajectoire d'une planète isolée autour du Soleil, déterminée selon la théorie newtonienne, est une ellipse invariable. Cependant, l'observation montre que le périhélie d'une planète (point le plus proche du Soleil au cours de sa trajectoire) se déplace lentement au cours des siècles ; son orbite n'est pas fixe mais tourne lentement dans son plan.

Cette perturbation du mouvement elliptique de chaque planète a pour cause divers facteurs : attraction des autres planètes, aplatissement éventuel du Soleil, etc. On peut calculer par la mécanique newtonienne classique, la valeur de l'avance du périhélie due à chacun des facteurs mais on constate qu'il reste un résidu : c'est une correction de RG.

L'étude du mouvement d'une planète dans le champ de gravitation créé par le Soleil peut être assimilé à celui d'une petite particule qui ne perturbe pas le champ à symétrie centrale sphérique étudié par Schwarzschild. La métrique de l'espace-temps où évolue la particule est celle donnée par la métrique de Schwarzschild.

Plus la planète est proche, plus le résidu est important. Pour Mercure, on observe un résidu de l'avance du périhélie par siècle de 43.11 ± 00.45 secondes d'arc (574 secondes d'arc en comptant tous les effets Newtoniens en plus), pour Vénus de 8.4 ± 4.8 , et pour la Terre de 5.0 ± 1.2 secondes.

"Paradoxe" du train et du tunnel $\blacktriangle$ Semay p75. Un train et un tunnel sont de même longueur propre L . Par contraction des longueurs, pour le conducteur, le tunnel est plus long que le train, alors que pour le tunnel, c'est l'inverse. Si le tunnel ferme sa porte d'entrée au même moment t où le train atteint la porte de sortie, le train est-il coincé ? La simultanéité est relative ! Pour le tunnel, le train sera contenu entièrement dans le tunnel au moment t . Pour le conducteur, quand il arrive au bout du tunnel, la porte ne se ferme qu'un instant Δt plus tard, le laissant le temps de rentrer dans le tunnel.

Questions

Choix

- Pourquoi Fizeau et pas Michelson Morley ? Parce qu'introduire l'éther (concept peu connu/pas manipulés là) et dire que cela n'existe pas, c'est pas aussi frappant de montrer que la composition des vitesses qui est elle bien connue, est mise en défaut. En plus, on peut revenir dessus après.
- Vous avez présenté comme "nouvelles" la dilatation des durées et la contraction des longueurs, pourtant les élèves connaissent déjà ces phénomènes en arrivant à une telle leçon, pourquoi en parler alors ? (Oui vues en terminale S, mais parachutées, ici on les retrouve à partir du principe de relativité.

Physique générale

- Définir la simultanéité.
- Perte de simultanéité implique perte de causalité ? Non car la causalité est liée à la conservation de l'intervalle d'espace-temps. Si $\Delta s^2 > 0$ dans un référentiel, il est de même dans les autres.
- Les lois de la physique sont les mêmes par translation temporelle, ça veut dire quoi ? Les formes des équations sont les mêmes. C'est la covariance. Mais l'invariance, c'est différent !
- Homogénéité de l'espace-temps, isotropie de l'espace sont-elles spécifiques à la relativité restreinte ? C'est aussi le cas en mécanique newtonienne. Ce n'est pas le cas en RG où les cluster de galaxies déforment l'espace-temps autour d'eux. En cosmologie, on trouve le principe cosmologique, homogénéité de l'espace-temps, isotropie de l'espace si on moyenne sur des échelles assez grandes. Mais récemment on propose des cosmologies non-homogènes pour expliquer l'énergie et la matière noire.

Culture

- La relativité restreinte intervient-elle au quotidien ou seulement dans des expériences de physique à grande échelle et/ou hautes énergies ? GPS.
- Postulats de la RG ?

- Expliquer les résultats sur le périhélie de Mercure, ordres de grandeur ? Où intervient la relativité ?
- Propriétés d'un muon en tant que particule ? Comment expliquer l'écart entre la valeur mesurée et le flux de muon que vous avez calculé avec la correction relativiste ? La seule source d'incertitude est-elle sur le rapport v/c ? Quelles énergies en jeu au CERN ?
- Composition du rayonnement cosmique ? primaire/secondaire ? Le rayonnement cosmique est le flux de noyaux atomiques et de particules de haute énergie (c'est-à-dire relativistes) qui circulent dans le milieu interstellaire. La source de ce rayonnement se situe selon les cas dans le Soleil, à l'intérieur ou à l'extérieur de notre galaxie. Le rayonnement cosmique est principalement constitué de particules chargées : protons (88 %), noyaux d'hélium (9 %), antiprotons, électrons, positrons et particules neutres (rayons gamma, neutrinos et neutrons). Le rayonnement primaire désigne les particules qui entrent dans l'atmosphère. Le rayonnement secondaire : les particules issues des interactions/réactions avec celles de l'atmosphère.

Relativité restreinte

- Plusieurs questions historiques : apports de Poincaré, Lorentz, Einstein, Fitzgerald ? Voir wikipedia : transformations de Lorentz. Fitzgerald formule l'hypothèse de contraction des longueurs, fondée sur une théorie électrostatique des interactions entre particules dans la matière, Lorentz propose des transformations rendent des équations diff. covariantes, Poincaré les corrige, Einstein les retrouve et les interprète.
- Donner la transformation de Galilée.
- La causalité est-elle un postulat ou une conséquence ? Conséquence.
- Pourquoi les transformations de Galilée et Lorentz sont linéaires ? Pour conserver $t_A - t_B$ en mécanique classique, il faut une transformation linéaire. Idem pour conserver s en relativité restreinte il faut des transformations linéaires. Mais en vrai on l'obtient avec les postulats (cf. Langlois).
- Quelles sont les hypothèses/la démarche pour arriver aux transformations de Lorentz ? $\blacktriangle$ Langlois. Si on veut respecter la constance de c , l'homogénéité de l'espace et du temps, les transformations doivent être linéaires. On utilise la symétrie x vers $-x$ pour éliminer les produits "temps-espace", puis l'isotropie pour que la partie espace soit proportionnelle à l'identité à un facteur dépendant de la norme de la vitesse relative près. En considérant 3 référentiels, d'angle variable, la constante est nécessairement 1. Pour que la vitesse de la lumière soit constante, les transformations doivent conserver s^2 i.e. conservent la métrique de Minkowski. On tombe alors sur le groupe de Lorentz.
- Comment inverser un boost de Lorentz ? Changer β en $-\beta$.
- L'invariance de l'intervalle de l'espace temps est équivalente à la forme des transformations de Lorentz ? Oui, on utilise le premier pour définir le deuxième, qui vérifie le premier aussi.
- Comment les postulats de la RR impliquent que la vitesse limite est c ? Il faut une masse nulle pour atteindre c . Aussi PFD uniformément accéléré, la vitesse donne un plateau à c . Aussi désintégrations de muons.
- Effet Doppler relativiste ? Effet Doppler transverse en mécanique classique ? Cet effet a-t-il été mesuré ? Sur quels systèmes ?
- Peut-on retrouver la perte de simultanéité sans les transfo de Lorentz ? Faites un dessin.
- Quelle jauge est invariante de Lorentz ? Intérêt ?
- Peut-on retrouver la contraction des longueurs à partir du quadrivecteur source $(\rho/c, \mathbf{j})$?
- Connaissez-vous le **paradoxe des jumeaux** ? Pouvez-vous expliquer en quelques mots ce paradoxe et le lever ? Peut-on réaliser cette expérience ? Un jumeau reste immobile, l'autre part et revient et le jumeau immobile est plus vieux. En effet, l'observateur inertiel qui va des événements A à B est celui qui maximise le temps propre (base de la formulation Lagrangienne). Où est-ce que la symétrie a été brisée ? Plusieurs écoles de pensée : (i) le jumeau voyageur change de référentiel inertiel entre l'aller et le retour d'où la dissymétrie (ii) le jumeau doit accélérer, mais en fait on peut rendre négligeable cette accélération en allongeant les voyages (??). **Explication** On sait que l'observateur inertiel qui va des événements A à B est celui qui maximise le temps propre. C'est donc le plus vieux. Mais la dilatation des temps en RR dit que c'est le référentiel au repos qui mesure le temps le plus court : appelé temps propre. *Contradiction ?* Effectivement, from the viewpoint of the traveler, a calculation for each separate tripe, ignoring the turnaround, leads to a result in which the Earth clocks age less than the traveler (*dilatation des temps*). The physical description of what happens at turnaround has to produce a contrary effect of double that amount. *Ainsi, le demi-tour a une très grande importance : c'est elle qui induit l'ordre des âges,*

on voit en dessinant les diagrammes espace-temps (*wikipedia EN*), que les lignes de simultanéité du voyageur subissent un saut au demi-tour ! **Réalisation** : On peut le faire avec des horloges atomiques et des fusées : voir expérience de Hafele-Keating.

- La norme de la vitesse de la lumière est identique dans tous les référentiels galiléens, qu'en est-il de sa direction de propagation ? Quelle est la conséquence de cet effet sur l'observation d'une étoile (aberrations de la lumière) ?

Expériences autour de la vitesse de la lumière

- **La valeur de c** aujourd'hui c'est quoi ? Comment on vérifie qu'elle est constante ? Elle est fixée. La seconde est fixée. Donc cela fixe le mètre. On sait qu'elle est constante : désintégration de pions dans un accélérateur qui produit des photons. Le photon détecté a la même vitesse que le pion soit relativiste ou quasi-immobile. On la mesure
- **Comment mesurer c ?**  *wikipedia anglais* (i) Par temps de vol, sur Terre. The setup as used by Fizeau consists of a beam of light directed at a mirror 8 kilometres (5 mi) away. On the way from the source to the mirror, the beam passes through a rotating cogwheel. At a certain rate of rotation, the beam passes through one gap on the way out and another on the way back, but at slightly higher or lower rates, the beam strikes a tooth and does not pass through the wheel. Knowing the distance between the wheel and the mirror, the number of teeth on the wheel, and the rate of rotation, the speed of light can be calculated. (i) Bis temps de vol, méthode astronomique. C'était la première méthode. Ole Christensen Rømer used an astronomical measurement to make the first quantitative estimate of the speed of light. When measured from Earth, the periods of moons orbiting a distant planet are shorter when the Earth is approaching the planet than when the Earth is receding from it. The distance travelled by light from the planet (or its moon) to Earth is shorter when the Earth is at the point in its orbit that is closest to its planet than when the Earth is at the farthest point in its orbit, the difference in distance being the diameter of the Earth's orbit around the Sun. The observed change in the moon's orbital period is caused by the difference in the time it takes light to traverse the shorter or longer distance. Rømer observed this effect for Jupiter's innermost moon Io and deduced that light takes 22 minutes to cross the diameter of the Earth's orbit. (ii) par interférométrie : on connaît f , mesure λ avec les franges. On remonte à c . (iii) méthode électromagnétique, on mesure ϵ_0 en mesurant des capacités, μ_0 (iv) par aberrations astronomiques. On repère le changement de position des étoiles au cours de la révolution de la Terre. (v) résonance dans une cavité.
- Expliquer l'hypothèse de l'éther. L'éther était le milieu de propagation supposé des ondes EM, par analogie avec l'acoustique. Dans le référentiel de l'éther, la vitesse de la lumière est constante égale à c .
- Expliquer l'**expérience de Michelson et Morley**. Déplacement des franges attendu, longueur des bras, précision d'un dixième de frange. date, précision, précautions expérimentales, utilité de tourner le dispositif ?  *Wikipedia FR*, bien fourni *EN* encore mieux. Longueur des bras 11 m (36 ft), The expected deviation of the interference fringes from the zero should have been 0.40 of a fringe - the maximum displacement was 0.02 and the average much less than 0.01 - and then not in the right place. Ils pouvaient mesurer jusqu'à 0.01 franges, en utilisant la lumière blanche. Difficultés : vibration des chevaux sur le pavé, orages.
- L'expérience de Michelson et Morley a été l'élément déclencheur de la RR ? On a cherché à sauver l'éther en disant qu'il était visqueux et que la Terre l'entraîne ou qu'il y avait une contraction des longueurs. Il a fallu un certain temps pour remettre en cause les transformations de Galilée.
- Comment on fait pour mesurer un temps en RR ?
- Quelle est la particularité des ondes lumineuses par rapport aux autres ondes ? Se propage sans milieu matériel, vitesse constante dans tous les référentiels, 2 polarisations.
- Existe-t-il une distinction entre le caractère homogène et le caractère absolu du temps ? Plus précisément, le caractère absolu entraîne-t-il le caractère homogène ? Absolu : ne dépend pas de l'observateur. Homogène : pas d'origine, d'instant privilégié, les lois de la physique sont les mêmes dans le présent, passé ou futur.
- Dans quels systèmes d'utilisation courante utilise-t-on des horloges atomiques ? GPS.
- Fonctionnement des détecteurs de muons dans l'expérience de Frisch et Smith ?
- Comment synchroniser deux montres dans un même référentiel ?
- Dans quel cas nous pouvons rencontrer la dilatation du temps ?
- Fonctionnement du GPS ? Corrections relativistes ? Précision ?
- Qu'est-ce qu'une horloge atomique ? Pourquoi veut-on mesurer le temps aussi précisément ? Définition de la seconde ? Qu'est ce que l'on fait de mieux pour mesurer le temps ?

Commentaires

- Bon choix de postulats : (i) Les lois fondamentales de la physique sont les mêmes dans tout référentiel (ii) Les lois de l'électromagnétisme sont des lois fondamentales.
- Perte de simultanéité : soit au début soit au moment des applications de transf. de Lorentz.
- Insister sur le caractère longitudinal de la contraction des longueurs.