

LP.6 Cinématique relativiste

Maria Ubero Gonzalez

16 juin 2020

Table des matières

1	Insuffisance de la cinématique classique	3
1.1	Inconsistance avec l'électromagnétisme	3
1.2	Expérience de Michelson et Morley	4
2	Fondaments de la cinématique relativiste	5
2.1	Postulats d'Einstein	5
2.2	Transformée de Lorentz	6
3	Conséquences	6

Rapport du jury

2014 : Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les candidats à faire preuve d'une grande pédagogie pour présenter des notions a priori non intuitives et faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair des notions d'invariant relativiste est attendu.

2013 : Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les candidats à faire preuve d'une grande pédagogie pour présenter des notions a priori non intuitives et faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair des notions d'invariant relativiste et de composition des vitesses et de ses propriétés est incontournable dans cette leçon. La réciprocité des effets de dilatation des durées et de contraction des longueurs doit être soulignée.

2012 : Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les étudiants à faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair de la notion de composition des vitesses et de ses propriétés est incontournable dans cette leçon. Les notions de dilatation du temps et contraction des longueurs doivent être discutées.

2011 : Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les étudiants à faire preuve d'une grande pédagogie pour présenter des notions a priori non intuitives et faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair de la notion de composition des vitesses et de ses propriétés est incontournable dans cette leçon.

2010 : Il n'entre pas dans le cadre de cette leçon de démontrer la transformation de Lorentz-Poincaré. La notion d'événement est un outil central.

2009 : Il n'entre pas dans le cadre de cette leçon de démontrer la transformation de Lorentz-Poincaré.

Jusqu'en 2007, le titre était : *Principes de la cinématique relativiste. Durée propre. Longueur propre.*

2007, 2008 : Les principes de la relativité restreinte doivent être énoncés de manière complète et précise. Les notions de durée ou de longueur propres ne prennent tout leur sens qu'en envisageant les phénomènes de contraction et dilatation. La description d'expériences ou d'applications mettant en jeu ces notions permet de rendre le contenu de cette leçon plus concret.

2006 : Les bases de la cinématique relativiste ne sont pas toujours bien comprises. La notion de durée propre et les phénomènes de contraction-dilatation doivent être abordés avec un soin tout particulier. Il ne faut pas se contenter de présenter cette leçon de manière théorique et laisser une bonne place aux applications.

2005 : La notion d'événement est cruciale. Les mesures des durées et longueurs « impropres » restent souvent mystérieuses.

2002 : Il est souhaitable de consacrer une partie de l'exposé aux fondements de la cinématique relativiste, en prenant soin d'utiliser un vocabulaire rigoureux. Un voyage interplanétaire effectué à la vitesse de $0.97 \times c$ ne peut constituer une illustration concrète du phénomène de dilatation des durées . . . Les applications réalistes, pour lesquelles les observations expérimentales réelles s'interprètent grâce aux résultats de la cinématique relativiste, sont à rechercher. Les définitions de la longueur propre et de la durée propre doivent être énoncées nettement. La notion d'événement doit être précisée.

Bibliographie :

- j

Pré-requis :

- k

Objectif.

Introduction

1 Insuffisance de la cinématique classique

Livre : C.Semay relativité restreinte

Peut être parler de la transformation de Galilée, référentiel, notion d'événement.

Les lois de la mécanique sont identiques dans tous les référentiels d'inertie. Pour passer d'un référentiel galiléen à un autre : transformation de Galilée.

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{V}t' \quad (1)$$

$$t = t' \quad (2)$$

temps considéré comme absolu : il s'écoule de la même manière dans les deux réf. On vérifie que ces transformations respectent le PFD.

Sur R :

$$\vec{F} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \quad (3)$$

Sur R' :

$$\frac{d^2 \vec{r}'}{dt'^2} = \frac{d^2}{dt'^2} (\vec{r} - \vec{V}t) = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \quad (4)$$

En mécanique classique, la force qui agit sur la masse m est indépendante du référentiel par rapport auquel on la mesure. On a donc $\vec{F}' = \vec{F}$.

Une conséquence immédiate des transformations de Galilée :

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V} \quad (5)$$

La lumière est une OEM dont le comportement est régi par les équations de Maxwell. Si la lumière est affecté de la même manière que les particules par la loi de transformation $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}$, alors la vitesse d'un rayon lumineux dépend du mouvement relatif de la source et de l'observateur. Nous allons voir que cela n'est pas observé expérimentalement (Michelson).

NOTES DE BRAHIM. pour Galilée espace temps absolu.

1.1 Inconsistance avec l'électromagnétisme

NOTES DE BRAHIM. Calculer Force de Lorentz dans R et R' montrer incompatibilité avec l'exemple du fil infini.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (6)$$

On peut après montrer les équations de Maxwell sur slide et les équations de propagation du champ électromagnétique dans le vide (eq de d'Alembert). La vitesse de la lumière s'exprime :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (7)$$

Les équations de Maxwell ci-dessus sont écrites dans un référentiel inertiel et la vitesse de la lumière, définie comme la vitesse de propagation des OEM, doit s'interpréter comme la vitesse de la lumière **par rapport à ce référentiel inertiel**. On peut alors se demander ce que deviennent les équations de Maxwell lorsqu'on les écrit dans un autre référentiel inertiel. On trouve qu'elles ne sont pas toutes invariantes par changement de référentiel galiléen, dans la transformation de Galilée. On peut le montrer avec la première équation dans le vide ($\text{div} \vec{E} = 0$). Mais ne pas le faire ! Je crois qu'il suffit si on le dit (demo faite Perez pag 12) **Les autres sont invariantes ???**.

Cela semble donc impliquer qu'il y a un référentiel privilégié dans lequel les loi de l'EM ont la forme simple qu'on a montré dessus. La lumière étant un phénomène ondulatoire, l'idée d'un référentiel privilégié n'est pas surprenante. Après tout, les autres phénomènes ondulatoires connus nécessitent l'existence dans milieu dans lequel les ondes se propagent (l'air ou l'eau par exemple). Il apparaît donc naturel aux physiciens du dix-neuvième siècle, que les OEM, et en particulier la lumière se propagent dans un milieu spécifique, auquel on a donné le nom **d'éther**.

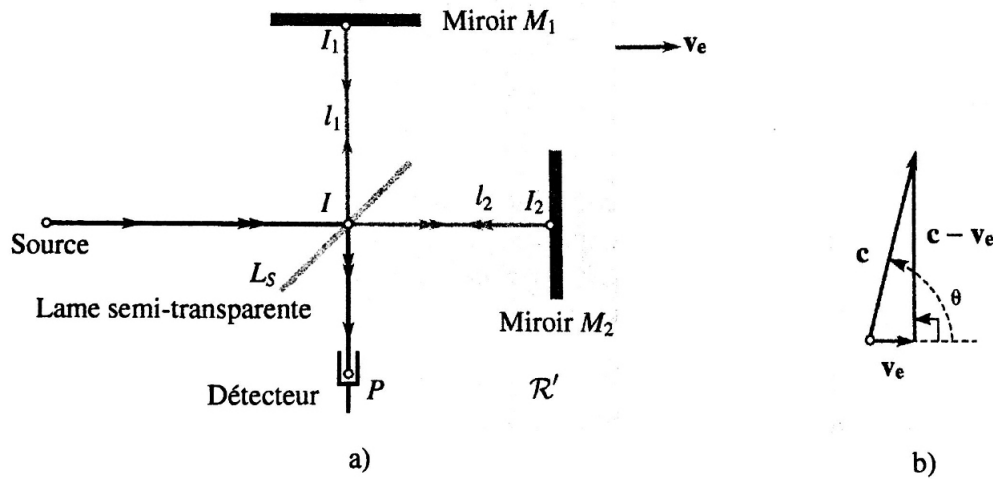
Dans cette perspective, la vitesse de la lumière qu'on a défini ci dessus correspond à la vitesse de la lumière par rapport à l'éther. Dans tout autre référentiel R' la vitesse de la lumière c' devrait être donnée par la loi classique de composition des vitesses :

$$\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v}_{R'/R} \quad (8)$$

Vers 1880, les physiciens, pour qui l'éther restait le substrat indispensable à la propagation des rayons lumineux, vont imaginer un certain nombre d'expériences pour mettre en évidence son existence. Telle est l'origine de l'expérience de Michelson en 1881, renouvelée en 1887 par Michelson et Morley, et ultérieurement de nombreuses fois avec une précision sans cesse accrue (destinée à mesurer la vitesse de la terre par rapport à l'éther).

1.2 Expérience de Michelson et morley

Partant du principe que la Terre est en mouvement dans l'éther et que la vitesse de la lumière est constante par rapport à l'éther, Michelson suppose que la mesure de la vitesse de la lumière doit donner des résultats différents suivant l'orientation de la vitesse de la Terre par rapport à l'éther. L'idée est alors d'essayer de mettre en évidence ces variations en faisant intervenir des phénomènes d'interférence lumineuse.



On trouve τ_1 et τ_2 fait Perez pag 8-9.

On fait varier 90° ??? xq??

Transition. Le désaccord est flagrant entre observation et calcul théorique dans l'expérience de Michelson et Morley. Comment l'expliquer ? L'expression des différences des temps de propagation de la lumière dans cette expérience s'obtient en supposant que la loi galiléenne d'addition des vitesses est valable pour les rayons lumineux. Comment donc concilier la mécanique classique de Newton, la théorie électromagnétique de Maxwell, la relativité galiléenne et les résultats de l'expérience de Michelson et Morley ? Plusieurs solutions s'offraient aux scientifiques du XIXesiècle :

- Admettre que la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell était fausse
- Admettre que les postulats de la mécanique classique étaient faux

La première solution est vite apparue inacceptable. Toute une série de belles expériences prouvaient nettement que toutes les prédictions de la théorie de Maxwell se vérifient très bien (par exemple la découverte des ondes radio). Finalement c'est la deuxième voie qui se révèle être la bonne : reconnaître que la mécanique classique se fonde sur des postulats qui doivent être abandonnés. La chose se fait graduellement, avec des scientifiques comme Fitz Gerald puis Lorentz et Poincaré, mais c'est Einstein en 1905 (alors âgé de 26 ans) qui fait le pas décisif en postulant le caractère non absolu du temps et de l'espace. Il élabore une nouvelle mécanique qui permet d'expliquer l'ensemble des résultats théoriques et expérimentaux concernant les ondes électromagnétiques. Cette théorie, la relativité restreinte, est basée sur deux postulats extrêmement simples.

2 Fondaments de la cinématique relativiste

2.1 Postulats d'Einstein

Le premier de ces postulats est l'élargissement à toutes les lois de la physique du principe de relativité.

Premier postulat : tous les référentiels d'inertie sont équivalents ; autrement dit, la formulation mathématique des lois de la physique doit être la même dans tous ces référentiels.

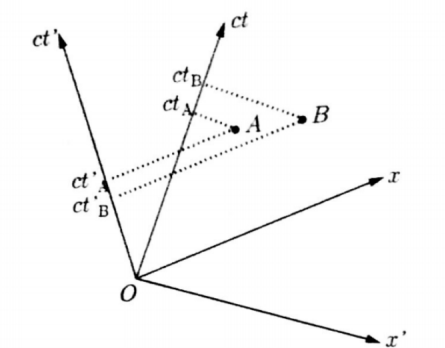
Deuxième postulat : le module de la vitesse de la lumière dans le vide est indépendant de l'état de mouvement de la source.

Einstein ajoute à cela le principe qui stipule que le formalisme Newtonien doit être la limite obtenue pour les petites vitesses : "limite classique". Ainsi la relativité apparaît comme un prolongement.

Transition. Nous avons vu que les transformations de Galilée doivent être remplacées par de nouvelles transformations qui, en particulier, laissent invariante l'équation de propagation des ondes électromagnétiques. Ces transformations sont appelées transformations de Lorentz.

2.2 Transformée de Lorentz

3 Conséquences



Conclusion

Diagramme de Minkowski : <https://www.youtube.com/watch?v=ii-KBKS0Dek&t=432s>

Cône de lumière : <https://www.youtube.com/watch?v=wDwX0H16USg>

Retour des oraux

Agrégation 2008 - Note : 04/20

Notion de perte de simultanéité ? (Il m'a été reproché de ne pas en avoir parlé). Pouvez-vous ré-expliquer l'expérience de Michelson-Morley ? Quelles sont les contraintes que doit vérifier une transformation ? En particulier celle de Lorentz ? (notion de causalité). Pouvez-vous ré-expliquer l'effet Doppler-Fizeau ?

Agrégation 2008 - Note : 16/20

Questions sur les postulats : homogénéité de l'espace-temps, isotropie de l'espace sont-elles spécifiques à la relativité restreinte ? La causalité est-elle un postulat ou une conséquence ? L'invariance des forces est-elle un postulat de la physique ? La relativité restreinte intervient-elle au quotidien ou seulement dans des expériences de physique à grande échelle et/ou hautes énergies ?

Agrégation 2010 - Note : 05/20

A l'issue de ma leçon, on m'a demandé quelques précisions sur mes signes, notamment dans l'expression du champ électrique dans un autre référentiel d'inertie. On m'a demandé quelques informations sur l'expérience de Morley et Michelson (déplacement des franges attendu, taille des bras) ainsi que des exemples (autres que la désintégration muonique et la modification du temps de parcours du TGV Paris-Lyon) où la dilatation du temps pouvait avoir des effets observables. On est restés longtemps sur la perte de simultanéité, car j'étais passé assez vite sur sa démonstration. Cette question a constitué l'essentiel de l'entretien, ce qui a laissé assez peu de temps pour d'autres questions. Pour finir, on m'a demandé d'expliquer ce qui se passait en réalité, et de lever le « paradoxe » apparent de la relativité restreinte.

Il faut être TRÈS propre sur les définitions (notamment celle d'un changement de référentiel, d'un événement...) et les différents objets manipulés (en particulier, les différents référentiels). Maîtriser les bases de la relativité restreinte n'est malheureusement pas suffisant pour bien aborder cette leçon, il faut faire un vrai effort pour enlever toutes les ambiguïtés de son exposé, et c'est malheureusement ce qui m'a fait défaut le jour J.

Agrégation 2012 - Note : 09/20

Des explications précises sur les expériences de Michelson et Fizeau : que mesure-t-on ? comment ? que voit-on ? conditions précises des expériences ? Lien entre contraction de l'espace et dilatation du temps ?

Agrégation 2013 - Note : 02/20

Comment être sûr qu'un des bras du Michelson est dans le sens du mouvement de la Terre dans l'expérience de Michelson Morley ? Expliquer le paradoxe des jumeaux.

Je n'ai pas eu le temps de traiter tout ce que j'avais prévu, notamment le paradoxe des jumeaux, la contraction des longueurs, la dilatation du temps, les exemples du temps de vie des muons, ou du train en mouvement avec les deux observateurs et les deux signaux, expérience qui met en évidence la perte de la simultanéité par changement de référentiel galiléen. Je maîtrisais le sujet parfaitement (j'adore la relativité) mais par manque de temps (car j'ai trop expliqué comme à des élèves) je ne l'ai pas traité complètement. Moralité : il ne suffit pas de savoir, il faut bien gérer son temps. La note est très sévère mais elle prouve que le jury ne note pas des compétences ou des connaissances mais note une prestation dans un format très précis qu'il faut absolument respecter.

Agrégation 2014 - Note : 14/20

Les questions ça a duré longtemps ... plus que les 20 minutes. Je trouvais que j'avais fait un truc vraiment bien et ils ont eu plutôt du mal à me coller dans les questions donc je trouve pas ça cher payé. Pendant les confessions, elle m'a dit -3 points parce que vous étiez beaucoup trop stressé et c'est pas bien pour un prof et -3 parce que vous avez dit certains trucs faux pendant les questions mais la leçon était très bien.

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 ? — Plusieurs questions historiques : apports de Poincaré, Lorentz, Einstein, Fitzgerald ? — Questions historiques sur l'expérience de Michelson : date, précision, précautions expérimentales ? Ré-expliquer la rotation du Michelson de 90° . Pourquoi prendre la vitesse de la Terre par rapport au système solaire pour le calcul ? Et si l'éther était lié au référentiel terrestre ? Fait-on encore ce genre d'expérience actuellement ? — Dynamique relativiste ? Quadri-vecteurs ? PFD relativiste ? Existe-t-il toujours des vecteurs (pas quadri) en relativité restreinte ? Existe-il l'équivalent d'une deuxième loi de Newton pour définir les référentiels d'inertie en relativité ? Autres manifestations de la contraction des longueurs / dilatation du temps ? — 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 ? — Quelle jauge est invariante de Lorentz ? Intérêt ? Peut-on retrouver la contraction des longueurs à

partir du quadrivecteur source $(\rho/c, \vec{j})$? Peut-on retrouver la perte de simultanéité sans les transfo de Lorentz ? Faites un dessin. — Paradoxe des jumeaux ? Est-ce que c'est vraiment à cause des phases d'accélération que l'on ne peut pas appliquer les transformations de Lorentz à la fusée ? Est-ce que ça a été réalisé en vrai ? — Expliquer les résultats sur le périhélie de Mercure, ordres de grandeur ? Où intervient la relativité ? — Effet Doppler ? Effet Doppler relativiste ? Effet Doppler transverse en mécanique classique ? Cet effet a-t-il été mesuré ? Sur quels systèmes ?

Agrégation 2014 - Note : 09/20

Détaillez le calcul de Michelson et Morley ? But premier de l'expérience de Fizeau ? 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 ?

J'ai plus ou moins suivi le BFR mécal et le Langlois, mais comme me l'a fait remarquer le jury durant l'entretien j'ai passé beaucoup trop de temps sur la première partie (transfo de Galilée et Michelson Morley) qui n'est pas au coeur du sujet de la LP et de ce fait je n'ai pas eu le temps de présenter la contraction des longueurs et l'intervalle espace/temps. Cependant ils ont apprécié l'usage des transparents, le fait d'apporter dès que j'ai pu une description des expériences qui ont confirmées ou infirmées l'avancée de la relativité (Michelson et Morley, Fizeau, Frisch et Smith).

Agrégation 2014 - Note : 16/20

J'ai présenté cette leçon en classe en 2013 et la prestation du jour J a correspondu exactement au polycopié de l'époque, transparents compris. La préparation s'est passée idéalement.

Quelle est la particularité des ondes lumineuses par rapport aux autres ondes ? Vis-à-vis de la constance de c ? (je n'ai pas trop compris le sens de cette question). Existe-t-il une grandeur invariante par transformation de Lorentz ? (carré de l'intervalle relativiste). Quel est l'intérêt de cet invariant et sa signification physique concrète ? Connaissiez-vous le paradoxe des jumeaux ? Pouvez-vous expliquer en quelques mots ce paradoxe et le lever ? Pouvez-vous donner les grandes lignes de la démonstration permettant d'aboutir à la transformation de Lorentz ? 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 ? (rires du jury qui a précisé que ça pourrait être un bon sujet de philosophie). Vous avez donné une valeur numérique de c : comment cette valeur est-elle déterminée expérimentalement aujourd'hui ? Les systèmes atomiques sont-ils soumis à la notion de temps propre ? Dans quels systèmes d'utilisation courante utilise-t-on des horloges atomiques ? (GPS). Concernant les détecteurs de muons, y a-t-il une condition sur le déclenchement du comptage ? (pas compris). Vous avez donné des dates tout au long de la leçon, pouvez vous préciser quand a été établie la transformation de Lorentz, par rapport aux travaux d'Einstein ? Pourquoi on ne l'appelle pas la transformation d'Einstein ? (apparemment, l'expression mathématique de la transformation de Lorentz a vu le jour avant Einstein, mais n'a été interprétée physiquement qu'ensuite).

Ils ont beaucoup aimé la leçon, le dynamisme et la pédagogie. La « raison pour laquelle la note n'est que de 16 » réside en un manque de clarté sur certains calculs et notamment pour l'expérience de Frisch et Smith ...