

LP06 – CINÉMATIQUE RELATIVISTE

17 juin 2021

Nicolas Barros & Abel Feuvrier

Correcteurs

SALAMBO DAGO, VICTOR DANSAGE

The time is gone, the song is over, thought I'd
something more to say

Lord Kelvin, Discours au Royal Institute (1899)
(approximatif)

Niveau : L3

Commentaires du jury

Bibliographie

↗ *Cours de MA & RR*, **Henning Samtleben**

→ pour tout, évidemment

↗ *Introduction à la relativité*, **Langlois**

→ cours de l'X, avec tout ce que ça implique

Prérequis

- Mécanique newtonienne, lois de Newton
- Équations de Maxwell
- Interféromètre de Michelson
- Notion de photon

Expériences

☛ mdr

Table des matières

1	Les limites de la cinématique galiléenne	2
1.1	Cinématique galiléenne	2
1.2	Le problème	2
1.3	L'expérience de Michelson-Morley	2
2	Les principes de la relativité restreinte	3
2.1	Les postulats fondamentaux	3
2.2	Quelques conséquences	3
3	Géométrie de l'espace-temps	3
3.1	Définitions	3
3.2	Transformations de Lorentz	3
3.3	Diagrammes de Minkowski	4

Pour le plan, il y a deux écoles : soit on balance tout de suite le formalisme des événements avec les transfos de Lorentz et on déroule, soit on essaye d'abord de construire une "intuition" avant de donner le formalisme. Il n'y a pas forcément de bon ou de mauvais choix, mais il faut bien être capable de justifier ceux qu'on fait.

Introduction

Contexte historique : 1900, Kelvin déclare à la Royal Institute de Londres qu'on avait fini la physique (en gros)¹. Honnêtement, il ajoute qu'il reste deux petits nuages : le rayonnement du corps noir, qui mènera au développement de la MQ dont nous ne parlerons pas ici, et l'expérience de Michelson-Morley, qui mènera au développement de la relativité. C'était un gros nuage, on va voir pourquoi.

1 Les limites de la cinématique galiléenne

En quoi l'expérience de Michelson-Morley était-elle si importante ?

1.1 Cinématique galiléenne

Définitions propres de référentiel : repère + horloge.

Loi de compositions des vitesses galiléenne : insister sur le résultat que la vitesse dépend du référentiel.

1.2 Le problème

Maxwell dit que la lumière se déplace à la célérité c **dans n'importe quel référentiel** : on a un problème.

Il faut donc trancher : soit Newton a tort et il faut revoir la cinématique galiléenne, soit Maxwell a tort et la lumière ne se déplace à la célérité c que dans un référentiel privilégié, appelé historiquement l'éther.

↓ Comment trancher ?

1.3 L'expérience de Michelson-Morley

C'est pour prouver l'existence de l'éther que Michelson a construit son interféromètre. Il a commencé les expériences en 1881, pour être rejoint ensuite par Morley, et a fini par publier les résultats en 1887. L'expérience sera refaite par la suite, de manière toujours plus précise.

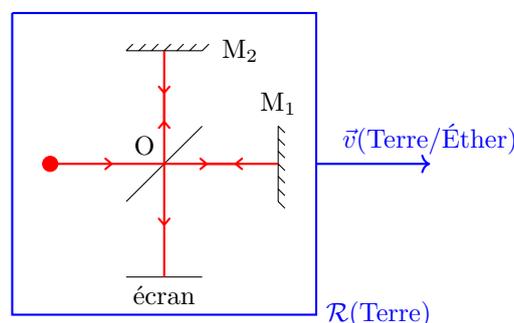


FIGURE 1 – Schéma de l'expérience de Michelson-Morley

Si on fait l'hypothèse que la lumière suit une loi de composition des vitesses galiléenne, alors on doit pouvoir observer une différence de marche associée, même au contact optique. C'est cette différence de marche que voulaient observer Michelson et Morley. (Cette différence de marche n'est pas la même suivant l'orientation de l'interféromètre

1. En revanche, le coup des décimales (comme quoi le travail des physiciens se bornerait à déterminer quelques décimales de plus sur les constantes de la nature) c'est pas lui. On a peut-être confondu avec Michelson. Source wikipédia.

par rapport à \vec{v} (Terre/Éther) : le protocole était donc de faire des observations à épaisseur constante mais à orientation variable. Les observations étaient faites à six mois d'intervalle, pour profiter de la rotation de la Terre autour du Soleil : on devait alors avoir un décalage observable, de l'ordre d'un dixième de longueur d'onde.)

On n'observe pas cette différence de marche, ni ici ni dans les autres expériences censées mettre en évidence l'éther (Fizeau par exemple). Donc on commence à se dire que Maxwell avait bien raison, et qu'il faut reconstruire la cinématique.

↓ *C'est ce que propose Einstein en 1905. Tout cramer pour repartir sur des bases saines, en somme.*

2 Les principes de la relativité restreinte

2.1 Les postulats fondamentaux

Les lois de la physique sont les même dans tous les référentiels galiléens et les équations de Maxwell sont des lois de la physique (donc la lumière se déplace à la célérité c dans le vide dans tous les référentiels).

2.2 Quelques conséquences

Dilatation du temps, contraction des longueurs, perte de simultanéité absolue. On montre tout ça avec des trains, "à la Henning". On a intérêt à s'arrêter sur l'introduction du facteur γ : définition, interprétation, cas limites. C'est aussi un de seuls endroits où on peut caser quelques ordres de grandeur : ne pas se priver. Ça permet aussi de dire que la cinématique galiléenne est très bonne tant que les vitesses ne sont pas de l'ordre de grandeur de c . On peut introduire le temps propre aussi (faut le caser quelque part en tout cas).

↓ *La distance spatiale entre deux points, la durée entre deux événements, leur simultanéité, étaient des invariants d'un référentiel galiléen à un autre en cinématique galiléenne. Qu'est-ce qui les remplace ? Pour continuer à faire de la cinématique, on doit reconstruire une géométrie.*

3 Géométrie de l'espace-temps

3.1 Définitions

Événement, intervalle d'espace-temps. Invariabilité de l'intervalle d'espace-temps.

↓ *Donc les transformations qui permettent de passer d'un référentiel à un autre sont celles qui préservent cet intervalle d'espace-temps.*

3.2 Transformations de Lorentz

On traite seulement l'exemple du boost selon x : on donne les nouvelles coordonnées en fonction des anciennes.

Que devient la loi de composition des vitesses donnée au début ? On fait le calcul, on donne le résultat, on en profite pour glisser un petit plot python.

↓ Y a moyen de "voir" tous ces résultats contre-intuitifs sur un diagramme.

3.3 Diagrammes de Minkowski

Suivant le temps qu'il reste, on peut juste introduire les diagrammes, reprendre une partie ou toute la deuxième section, parler de causalité...

Conclusion

Et la dynamique, qu'est-ce qu'elle devient ?

Questions

- Que pouvez vous dire sur l'autre nuage mentionné par Lord Kelvin ? Qui a résolu ce problème ?
- Quels sont les invariants en cinématique newtonienne ? -la distance spatiale et le temps
- Comment s'appelle la transformation permettant de changer de référentiel ? -de Galilée
- Énoncez le principe de relativité. Définition de référentiel galiléen. Quels exemples ?
- Quelles sont les équations de Maxwell ? D'où vient c ? La lumière se propage-t-elle toujours à la vitesse c ?
- Sur l'expérience de Michelson, qu'elle est la différence de marche entre les deux bras ? Comment la faire comprendre -on pourrait penser que $c-v$ et $c+v$ se compensent-. Utilisez peut-être la contraction des longueurs. Autre expérience possible : Fizeau.
- Qu'est-ce qu'un postulat ? Différence entre loi et postulat. C'est quoi un principe ?
- Connaissez-vous une autre formulation des deux postulats ?
- Comparez Δt et $\Delta t'$, intuitivement -sans refaire le calcul.
- Dites m'en plus sur les muons. D'où viennent-ils ? Comment déduire leur temps de vie ? Insistez sur le temps propre. On attend plus ou moins de muons qu'observé ?
- Un élève dit OK. Il y a dilatation. Mais si on regarde du point de vue de l'autre corps -ou astronaute-, ne pourrait-il pas dire la même chose de son point de vue. Comment résoudre le paradoxe ? Qui a raison ?
- Comment définir une unité de longueur, sans passer par un temps ?
- Diagramme de Minkowski. Comment construire le diagramme ? Que deviennent les axes sous transformation de Lorentz, de Galilée

Commentaires et remarques

- Le nom à mentionner en première partie, c'est Galilée : les référentiels, les boost, la composition. Galileo Galilei.
- en relativité restreinte, il n'existe pas vraiment de solide indéformable (la longueur va dépendre de l'observateur).
- Il peut y avoir perte de la simultanéité, mais la causalité doit être toujours vérifiée.
- Cette leçon correspond à la première introduction à la relativité. On se doit d'être le plus clair possible, avec de la rigueur sur le formalisme et le vocabulaire.
- Autre possibilité : Introduire d'abord le formalisme, la notion centrale d'événement, et ensuite dérouler sur tous les exemples et expériences de pensée avec les bons outils.

- Il faut insister sur la notion de temps propre, d'ordre de grandeur, et donner plus d'applications. Le plan est OK, mais il faut rentabiliser davantage les calculs. Traiter la causalité et la simultanéité. Montrer que l'intervalle de temps se conserve sur les exemples. Insister sur le fait que le boost se fait selon x .
- Application en III