

LP 06 Cinématique relativiste

Naïmo Davier

Agrégation 2019

Contents

0.1	Introduction	2
1	Insuffisance de la cinématique classique	2
1.1	Transformation de Galilée et électromagnétisme de Maxwell	2
1.2	Hypothèse de l'éther : expérience de Michelson et Morley	2
2	Fondements de la cinématique relativiste	3
2.1	Postulats	3
2.2	Transformée de Lorentz : 1904	3
2.3	Intervalle entre deux évènements	3
3	Conséquence	4
3.1	Dilatation du temps	4
3.2	Vérification expérimentale	4

Bibliographie : Pérez, Boratav et le Grossetête

Niveau L3, pré-requis : dynamique newtonienne, électromagnétisme.

0.1 Introduction

Création historique de la notion de référentiel galiléen (1687), associé à la transformation galiléenne. Incompatible avec la théorie de l'électromag (1870), puisque la théorie newtonienne stipule que les lois de la physique sont invariantes par changement de ref galiléen, ce qui n'est pas le cas pour l'électromag.

1 Insuffisance de la cinématique classique

1.1 Transformation de Galilée et électromagnétisme de Maxwell

On écrit l'expression de la force de Lorentz pour une particule de charge q

$$F = q(E + V \times B) \quad (1)$$

puis on regarde comment elle se comporte par changement de référentiel : on fait la transformation de la vitesse : $v' = v + v_e$ et de la charge $q = q'$, on trouve alors que pour que cette force soit la même dans les deux référentiels il faut que les champs électriques perçus soient différents : problème.

On a donc introduit la notion d'éther pour expliquer ce résultat, milieu dans lequel se propage les ondes électromagnétiques à la vitesse c .

1.2 Hypothèse de l'éther : expérience de Michelson et Morley

Cette hypothèse a pour principe de déterminer la vitesse de translation du référentiel terrestre par rapport à celui dans lequel l'éther est fixe.

On présente l'interféromètre de Michelson à l'aide d'un schéma, puis on explique ce que l'on s'attend à observer avec l'expérience réalisée, dans le cas où l'éther existe bel et bien. On peut donner les résultats des calculs et ainsi dire quels sont les mesures auxquelles on s'attend avec les caractéristiques des instruments de l'époque.

On a comme résultat, qu'aux incertitudes près on a aucune différence de phase entre les deux bras : pas d'éther.

À la découverte des ondes radio on renforce la confiance que l'on avait dans le modèle de MAXWELL et on arrive donc à la conclusion qu'il faut introduire une nouvelle transformation : la transformation de Lorentz (nom donné par Poincaré).

On donne la transformation, on peut la comparer à la transformation de Galilée : cette fois-ci le temps n'est plus absolu et commun à tous les référentiels : il dépend maintenant du ref choisi.

2 Fondements de la cinématique relativiste

2.1 Postulats

On conserve le postulat de Newton : **principe de la relativité** : quel que soit le référentiel choisi les équations de la physique sont les mêmes, on passe d'un ref à l'autre via la transformation de Lorentz.

2e postulat : la norme de la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels.

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.

2.2 Transformée de Lorentz : 1904

Introduire la notion d'évènement.

On vérifie le principe d'équivalence en regardant le DL de la transformation de Lorentz, qui nous donne la transformation de Galilée à l'ordre un en v_e/c .

Propriétés de la transformation : réciprocity, impose c comme vitesse limite, on montre que la quantité

$$\Delta s^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad (2)$$

est conservée par transformation de Lorentz. Qu'est ce que cette quantité a de particulier ? C'est ce que l'on va voir maintenant.

2.3 Intervalle entre deux évènements

En cinématique newtonienne l'intervalle de temps, et la distance en deux évènements sont tout deux invariants pas transformation de Lorentz. Ici on a vu que l'intervalle n'était plus conservé, on va donc ici interpréter ce Δs comme la mesure d'un intervalle, mais du genre temps-espace cette fois.

Cas de deux évènements qui sont liés par un signal lumineux, on peut facilement voir que d'exprimer la vitesse du photon liant ces deux évènements impose

$$c^2 = \frac{(x_1 - x_2)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}{(t_1 - t_2)^2} \quad (3)$$

que ce nouvel intervalle introduit soit conservé.

Notion d'intervalle de genre temps : $\Delta s^2 > 0$, espace $\Delta s^2 < 0$ et lumière $\Delta s^2 = 0$, principe de causalité.

3 Conséquence

3.1 Dilatation du temps

On considère deux référentiels galiléens en translation l'un par rapport à l'autre, et on regarde les temps donnés par deux horloges situées chacune dans un référentiel. Introduire la notion de temps propre et montrer que dans tout autre ref le temps est dilaté.

Notion de paradoxe des horloges.

3.2 Vérification expérimentale

Donner la date, expérience d'observation de muons, particules ayant un temps de vie trop court pour être détectés au sol selon la cinématique newtonienne.

Conclusion

La théorie de l'électromagnétisme aura conduit à revoir notre perception de l'espace et aura engendré la naissance d'une théorie dont les résultats sont tout aussi saisissants que vérifiés.

Questions

Comment lève-t-on ce paradoxe des horloges ?

Ce n'est pas un paradoxe... on regarde juste la symétrie.

Qu'est-ce que la notion de perte de simultanéité ?

Quelles sont les contraintes que chaque transformation doit satisfaire ?

Linéarité, réciprocité, équation d'onde : $x^2 = ct^2$ conservé.

Les postulats : homogénéité et isotropie de l'espace sont-ils propres à la relativité restreinte ?
Ce sont les postulats appliqués pour obtenir le principe cosmologique en RG.

Exemples d'effets relativistes dans la vie commune ?

GPS. Structure hyperfine des orbitales atomiques.

Remarques

Il faut bien insister à chaque fois sur la notion d'évènement.

On peut parler de la composition des vitesses : c'est tout de même la différence majeure entre relativité et newton : la composition des vitesses n'est plus vectorielle. Dans ce cas ne faire que ce calcul au tableau pendant la leçon, projeter les autres. La mettre en II.3, et passer le II.3 au III.1. Illustrer avec le cas de deux particules à $0.9c$ qui vont entrer en collision : calculer alors la vitesse relative.

On peut évoquer Doppler relativiste comme conséquence.

Partir du fait que la vitesse de la lumière apparaît comme constante : l'introduire avec l'expérience de Michelson, et supprimer la partie 1.1 pour gagner du temps.

Attention avec le principe d'équivalence qui est lui en RG : il concerne l'équivalence de la masse grave et de la masse inerte.

Redéfinir à l'oral la notion de référentiel galiléen.