

LP-58-Cinématique relativiste

Maud

12 juin 2022

Pré-requis

-

Références

- [1] Michel Bertin, Jean-Pierre Faroux, and Jacques Renault. *Mécanique 1 : mécanique classique de système de points et notions de relativité*. Mathématiques supérieures. DUNOD, 1984.
- [2] David Langlois. *Introduction à la relativité*. Licence 2 et 3. Vuibert, 2011.
- [3] José-Philippe Pérez and Nicole Saint-Cricq-Chéry. *Relativité et quantification : avec exercices et problèmes résolus*. Masson, Paris, 1986.

✦ Cours cinématique relativiste sornette

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Définitions	2
2	Limite de la cinématique classique	2
2.1	Principe de relativité et définition	2
2.2	La transformation de Galilée est l'électromagnétisme	2
2.3	Expérience de Michelson et Morley	3
3	Principe de la relativité	3
3.1	Postulats d'Einstein	3
3.2	Relativité de la simultanéité	3
3.3	Dilatation du temps	3
3.4	Contraction des longueurs	3
4	Transformation invariante en relativité restreinte	4
4.1	Invariant relativiste	4
4.2	Boost de Lorentz	4
4.3	Addition des vitesses	4
5	En plus	4

1 Introduction

Introduction pédagogique

Objectifs pour les profs

-

Objectifs pour les élèves

-

Activités pour les élèves

•

Introduction générale

Remarque

Découpage du temps en partie :

1.1 Définitions

Notion d'événement voir [1] p.212 Notion de transformation

2 Limite de la cinématique classique

2.1 Principe de relativité et définition

L'objectif du physicien expérimentateur est de réaliser des mesures à partir d'observations. Mais ces mesures dépendent a priori du référentiel dans lesquelles elles sont effectuées. Le physicien cherche alors à déduire des mesures réalisées des lois objectives, ne dépendant pas de l'expérimentateur ni du lieu où l'expérience est réalisée. On est donc amené à utiliser la notion d'invariant, c'est-à-dire à trouver des expressions mathématiques ne dépendant pas du référentiel ou de l'expérience. Par exemple, si on considère deux repères orthonormés fixes dans l'espace, la longueur entre deux points calculée dans chacun des deux repères sera la même : la longueur est ici un exemple de grandeurs invariante vis-à-vis d'un changement d'observateur, l'un étant fixe par rapport à l'autre. Il reste maintenant à définir ce que l'on mesure. En mécanique du point, on cherche par exemple à connaître la position d'un point matériel en fonction du temps. On définit la notion d'événement comme l'ensemble des quatre grandeurs scalaires (t, x, y, z) . Par exemple, la désintégration d'une particule située en (x, y, z) à l'instant t constitue un événement.

Principe de relativité L'étude de la physique met en évidence certaines invariances. On a ainsi invariance de forme des lois physiques par translation du système d'axes, par rotation du système d'axes, ou encore par translation temporelle. On est donc amené à écrire le principe de relativité ainsi : « Les lois physiques sont invariantes vis-à-vis des translations et des rotations des systèmes d'axes, et des translations temporelles. » En mécanique classique, on a en plus invariance des lois physiques par changement de référentiel galiléen.

2.2 La transformation de Galilée est l'électromagnétisme

[1] p.210 lire l'intro La transformation de Galilée permet de relever dans le cadre de la cinématique classique des coordonnées d'un même événement dans deux référentiels galiléens différents. On montre que les équations de Maxwell ne sont pas invariante par transformation de Galilée. P.214 : en la mécanique classique :

- la force apparaît comme une grandeur invariante vis à vis d'un changement de référentiel galiléen
- le temps est absolu, i.e. indépendant du référentiel galiléen dans lequel on se place

Transition

Est-ce que la transformation de Galilée laisse invariante les autres lois de la physique, en particulier les lois de l'électromagnétisme ?

L'électromagnétisme prévoit la propagation des ondes dans le vide à c , constante fondamentale. **Mais dans quel référentiel cette vitesse est-elle définie ?** On a deux options [1] p.215 :

- il existe un référentiel privilégié dans lequel les ondes EM se propagent
- les équations de Maxwell sont valables dans tous les référentiels, c'est ok pour la relativité mais c'est pas compatible avec la cinématique classique car on a la composition des vitesses lors d'un changement de référentiel et donc on entre en contradiction avec l'hypothèse initiale

Transition

Pour trancher entre les deux options, on se réfère à l'expérience.

2.3 Expérience de Michelson et Morley

Le but de l'expérience est de détecter un mouvement relatif entre la Terre et l'éther par des moyens optiques. [2] P.9 et pour le nombre de franges faut aller voir le BFR[1] p.217 et [Wikipédia notre ami](#). On oublie pas de confirmer le DL avec l'ordre de grandeur de vitesse de la Terre sur celle de la lumière.

Remarque

Aller voir l'expérience de Fizeau sur wikipédia

Transition

L'expérience de Michelson et Morley ne peut pas être considérée comme une base expérimentale suffisante pour la relativité restreinte. Mais d'autres expériences comme celle au CERN sur la désintégration des mésons ou encore l'étude de la dépendance de l'énergie cinétique en fonction de la vitesse infirment la mécanique classique [1]p.218

3 Principe de la relativité

Remarque

Einstein a eu la clairvoyance de rechercher la cause de cette incompatibilité dans un postulat implicite (c'est-à-dire sous-entendu) en mécanique classique, l'existence d'un temps universel indépendant du référentiel dans lequel on se place. C'est parce qu'il est difficile de contester ce dont on n'a pas conscience, qu'il a fallu du génie pour le faire.

3.1 Postulats d'Einstein

On va voir la formulation dans [2] p.11 En plus, la relativité restreinte suppose l'espace et le temps homogène, ce qui signifie qu'il n'y a pas de localisations dans l'espace ou le temps qui soient privilégiées ce qui n'est pas le cas en relativité générale

Transition

Quelles sont les conséquences ?

3.2 Relativité de la simultanéité

cf. cours d'Henning + Diagramme espace temps ? On illustre sur le diagramme on explique que l'on choisit et plutôt que t par homogénéité avec x .

3.3 Dilatation du temps

cf. cours Henning + def temps propre + exemple de la désintégration des muons voir [ici](#) et [1] p.237 Autre effet de la dilatation du temps : l'effet Doppler transverse [1] p.245

3.4 Contraction des longueurs

cf. cours Henning + exemple [2] p.45 paradoxe de la barre et de l'ouverture

4 Transformation invariante en relativité restreinte

4.1 Invariant relativiste

Source cours de Sornette p.15 du PDF On arrive à :

$$\begin{aligned} \|\vec{AB}\| &= c(t_B - t_A) \\ \|\vec{AB}\|^2 &= c^2(t_B - t_A)^2 \\ (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2 - (ct_B - ct_A)^2 &= 0 \end{aligned}$$

On va définir la métrique de Minkowski mais ça on le dit pas, on le garde en question ? Si on a le temps on définit les intervalle genre temps, espace et lumière grâce au cours d'henning.

4.2 Boost de Lorentz

Grace aux relations entre les positions vis à vis de deux référentiels inertiels, on a :

$$x' = \gamma(x + vt')$$

et

$$x = \gamma(x - vt')$$

On isole t' dans la première équation et on injecte l'expression de x et on trouve les relations que l'on peut mettre sous forme d'une relation matricielle. On peut vérifier si on a le temps que cette transformée est invariante d'après ce qu'on a montré précédemment. Mais on le fait pas si on a pas le temps.

4.3 Addition des vitesses

cf cours Henning A couper si on n'a pas le temps

5 En plus

"Paradoxe" du train et du tunnel 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.

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.

Paradoxe des jumeaux [3] p.41 et [1] p.240

Effet Doppler [3] p.47

BO