

LP 06: Mécanique relativiste

ceci est un inventaire des notions importantes à faire passer à travers cette leçon.

I) Aspects historiques

① Il est bien sûr obligatoire de commencer à parler de RR à partir de la transformation de Lorentz - Poincaré (fin 19^{es}) et des postulats d'Einstein (1905).

② Mais avant cela, il faut parler de la situation historique et de la mécanique de Newton - Galilée : temps et espace absolus (càd commun à tous les observateurs) et complètement découplés. On peut introduire la transformation de Galilée et même le principe de relativité de Newton (P 8 de [1]) qui dit que toutes les lois de la physique (de l'époque de Newton) sont invariantes par changement de référentiel galiléen.

③ Ensuite, on expose le problème de l'EM (1870) vis-à-vis de la trans de G.
→ existence d'une vitesse de la lumière dans le vide qui semble être indépendante du choix du référentiel.

2 choix : soit TG valide mais \exists éther
soit TE sans \times (et donc \nexists éther)

④ Rôle joué par l'expérience de Michelson-Morley (1887)
But: mesurer la vitesse de la terre / éther
càd vitesse de la lumière dans le labo dans la direction de Terre/éther.

et on a mesuré que la vitesse de la lumière dans le labo est c (dans toute les direct)
→ donc l'éther ne semble pas exister

⑤ C'est alors que l'on peut introduire la transformation de Lorentz - Poincaré qui est la seule EM invariante pour les postulats d'Einstein qui remettent en cause les notions d'espace-temps de Newton - Galilée.

II) Ce qui change, relativité du temps et des longueurs

① Ensuite on pourra introduire les notions de dilatation des durées, contraction des longueurs à partir de la transformation de Lorentz - Poincaré ou à partir d'exemples concrets (aller voir dans [2])

⚠ Bien définir les notions de temps propre et longueur propre. Dire que ce sont des invariants. Bien dire que les effets de dilatation des durées / contractions des longueurs sont des effets liés à la mesure uniquement (Aucune des 2 horloges à une mécanique différentielle).

On pourra accompagner les notions de dilatation des durées et de contractions des longueurs d'exemples concrets.

P 55 de [2]
p 130 de [4]
(Mesure du temps de décroissance des muons par Fitch-Smitly (1963), l'expérience de Everest Stillewell 1938, l'expérience de Hafele-Keating (1971) avec les horloges atomiques (mais faites attention avec la denture car les référentiels sont non galiléens (RG oblige))

② On pourra également parler de la transformation des vitesses accompagné de l'expérience de Fizeau 1851.

⚠ Attention le but de Fizeau était de mesurer un entraînement éventuel de l'éther par le courant d'eau.
(C'est bien expliqué page 47 de [1])

⚠ Il peut-être conseillé d'utiliser le formalisme des quadrivecteurs vitesses pour démontrer la transformation des vitesses car cela permet d'introduire les u (certains jony peuvent l'attendre).

③ On pourra également parler de la relativité de la simultanéité voir p 24 de [1] (très bien fait).

⚠ On pourra en profiter pour introduire les diagrammes de Minkowski et les utiliser pour montrer la non simultanéité. Choisir 2 événements simultanés pour un observateur R (ça peut être la réception d'un signal lumineux) et montrer avec un diagramme de Minkowski qu'ils ne le sont plus pour un autre observateur.

④ On pourra également introduire l'intervalle d'espace-temps et montrer (ou pas) que c'est un invariant. Ce lui ξ est égale à $c^2 \tau^2$ où τ est le temps propre donc on pourrait l'introduire après la dilatation des durées (après avoir introduit le temps propre).

⑤ on pourra également traiter une application supplémentaire si on a le temps

Idées : → Aberration relativiste des étoiles (p 53 de [1])
→ effet Doppler relativiste en utilisant le formalisme des 4-énergie-impulsion du photon (p 58 de [1])

I dées (bis): → course poursuite relativiste entre
lière et tortue. Qui courra
le premier? Du point de vue de
a ou? (Ex page 69
page 69) (Ex p 4-6 de [3])
→ Paradoxe des Semeaux (1911)
à condition de le faire propre.
C'est très bien fait et de 2 manières
dans le SMITH (chapitre 6 [2])

Conseils supplémentaires:

- * Bien dire ce qui change par rapport
au cas Newtonien.
- * Bien dire que dans les limites de faibles
vitesses, on retrouve Galilée-Newton.
- ▲ Ce n'est pas seulement applicable à la
physique des particules
Ex = GPS
- * DM pourra montrer avec les diagrammes
de Minkowski que si 2 événements sont
causaux (l'un est dans le cône de lumière
de l'autre) dans un ref alors ils le sont
aussi dans tous les autres réf Galiléen.
- * Il est difficile de trouver des vérifications
expérimentales de la contraction des longueurs
car on mesure mieux une durée.

Biblio:

- [1] C. Grassie tête "Relativité restreinte
et structure atomique de la matière"
- [2] James H. Smith "Introduction à la
relativité"
- [3] José-Philippe Pérez "Relativité"
- [4] James B. Hartle "Gravity"
mais aussi:
- [5] BFR "Mécanique 1"

LP 06 : Cinématique relativiste

Niveau: L3 Prerequis: Méca. Newtonienne, réf gal - effet Doppler classique - interférences, Michelson

Intro: La RR est une des grandes révolutions du 20^{es} s. Elle a détruit la conception intuitive de l'espace-temps qui existait jusqu'alors, celle de Galilée-Newton. La méca de Galilée-Newton est basée sur la croyance en un tps absolu, ordonné en termes de présent, passé et futur, ordre partagé par tous les observateurs et en un espace absolu régi par la géométrie euclidienne. Temps et espace n'entraînent aucun forme de relation structurelle et sont indépendants de l'observateur considéré.

I) De Galilée à Einstein

a) Incompatibilité entre EM et TG

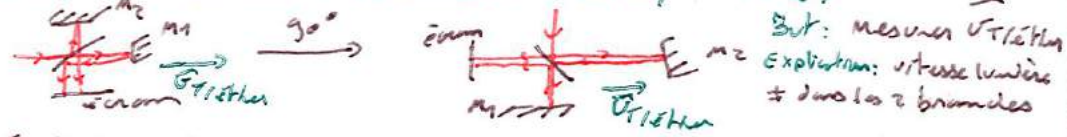
Evènement: $\begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}_R \rightarrow \begin{pmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}_{R'}$

Transf de Galilée: $\begin{cases} ct' = ct \\ x' = x - \frac{v}{c} ct \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad \beta \hat{=} \frac{v}{c}$

Principe de relativité: si on dérive 2 lois (1^{re} → à inviolable → 2nd loi de Newton invariante)

Problème de EM: $\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0} \rightarrow$ prop à la vitesse c
 → conduit à considérer un réf privilégié: l'éther

Expérience de Michelson-Morley 1887



Décalage syst de 8 franges $\Delta \text{Path} = 0 \rightarrow$ Loi EM invariante (cst réf G)

b) La révolution de 1905

- Remplacer TG par transf qui laisse EM inv → Lon-Polac
- Redéfinir concept d'espace-temps → Einstein

Les postulats d'Einstein 1905

- 1^o) Les lois de la physique sont invariantes par changement de réf G (princ. de relativité de Newton élargi)
- 2^o) c est indépendant du mouvement de la source (constante de physique à la possible)
- 3^o) si $\frac{v}{c} < 1 \rightarrow$ Galilée (on ne jette pas 200 ans de physique à la poubelle)

Transformation de Lorentz - polycarré
 → doit laisser EM invariante

$$\begin{cases} ct' = \gamma (ct - \beta xc) \\ x' = \gamma (xc - \beta ct) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad \begin{matrix} \leftarrow t \text{ n'est plus absolu} \\ \beta \hat{=} \frac{v}{c} \\ \gamma \hat{=} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{matrix}$$

Odg: Minage 2000 à Mach 2
 $\beta = 0,2 \%$
 $\gamma = 1,000002$

II) Conséquences cinématique

a) Intervalle d'espace-temps événements A, B, $y_A = y_B, z_A = z_B$

$$\Delta \Delta_{AB}^2 = c^2 (t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2$$

$$\Delta \Delta'_{AB}^2 = c^2 (t'_B - t'_A)^2 - (x'_B - x'_A)^2$$

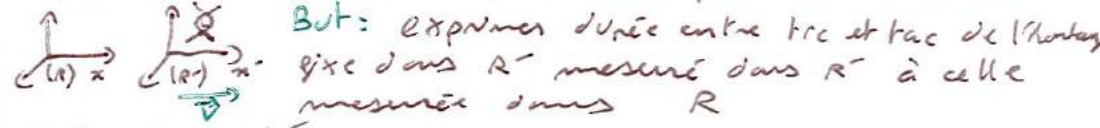
$$= \gamma^2 (c(t_B - t_A) - \beta(x_B - x_A))^2 - \gamma^2 ((x_B - x_A) - \beta c(t_B - t_A))^2$$

(les termes croisés s'annulent, on met en fait les termes)
 $= c^2 (t_B - t_A)^2 \gamma^2 (1 - \beta^2) + (x_B - x_A)^2 \gamma^2 (\beta^2 - 1)$

→ $\Delta \Delta_{AB}^2$ invariant relativité au même titre que c

b) Dilatation des durées

→ à posé beaucoup de prob aux prémices de la RR



$R' \rightarrow \Delta t'_0, \Delta x' = 0 \quad c \Delta t = \gamma (c \Delta t'_0 + \beta \Delta x' = 0)$

$R \rightarrow \Delta t \text{ (tp propre)} \rightarrow \Delta t = \gamma \Delta t'_0 \geq \Delta t'_0$

Prop: Le temps propre est toujours plus court

- Rem: - effet réciproque
 - effet purement cinématique (≠ méca des ressorts des horloges)

Verif exp: temps de décroissance de Muons CERN 1977
 Muons au repos $\rightarrow T_0 \quad d = \frac{v}{c} \quad \left| \frac{d - T_0}{T_0} \right| < 10^{-3}$ Rossi
 $v \rightarrow \gamma = 29 \rightarrow T$ Frish-Smith 1962

→ Interet pour la physique des particules ($T > T_0$)

c) Contraction des longueurs

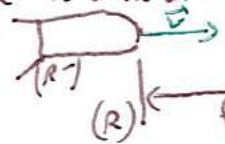
→ étroitement lié à la dilatation des durées

→ Pour s'en convaincre:

$$R' \rightarrow \Delta t', l$$

$$R \rightarrow \Delta t, l_0$$

$$\begin{cases} \Delta t' = \frac{l}{v} \\ \Delta t = \frac{l_0}{v} \end{cases} \quad \Delta t' = \frac{\Delta t}{\gamma} \rightarrow l = \frac{l_0}{\gamma} \leq l_0$$



2 événements: nez gauche au début d'une barrière.

Prop: La longueur propre est toujours plus longue

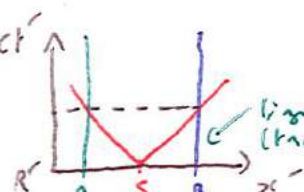
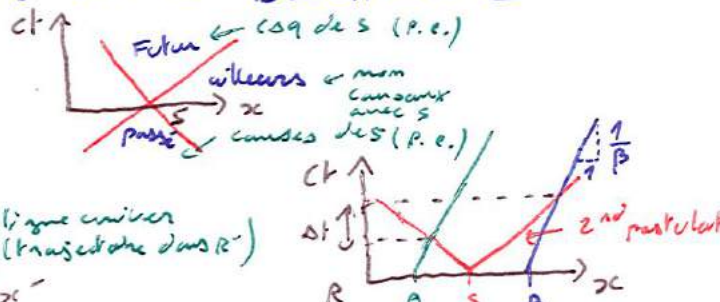
Rem: Les long \perp au mov ne sont pas affectées (Lorentz)

→ on a vu que le temps et l'espace ne sont plus absolus et dépendent de l'observateur

→ cela est étroitement lié à la relativité de la simultanéité (rigor)

d) Relativité de la simultanéité

Minkowski



e) Transformation des vitesses

→ exprimer vitesse particule dans R' en fonction de la vitesse de cette même particule dans R

$$u_x' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{\gamma(dx - \beta c dt)}{\gamma(dt - \beta dx/c)} = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$$

$$u_y' = \frac{dy'}{dt'} = \frac{u_y}{\gamma(1 - \frac{u_x v}{c^2})}$$

→ on retrouve bien c à faible vitesse

Expérience de Fizeau 1851 (Blancard 1905)

But: Déterminer vitesse de la lumière (courant d'eau)



Explication: vitesse lumière \neq dans les 2 voies
 Dans une voie, propog dans le sens du courant d'eau
 Dans l'autre, propog dans le sens opposé au courant d'eau
 Trouvé des vitesses sachant que la vitesse dans le vide est c

$D_{PC} = 0,5$ frange or $D_{exp} = 0,1$ frange
 → on remplace eau par benzène → 800 nm (1 - 1/2v)
 $D_{PR} = D_{PC} (1 - \frac{1}{2}v) = 0,03$ frange → ok
 → Se vous est présentée l'essentielle des bases de la cinématique relativiste
 → traitons quelque chose de plus original

III) Propagation de signaux

→ Dans le but de résoudre le paradoxe des jumeaux...

a) L'effet Doppler - Fizeau

→ variation de la freq d'une onde lumineuse lorsque la source et l'observateur sont en mov relatif.

classique: $\nu_0 = \frac{\nu_s}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}$
 relativité: $T_s = \gamma T_s^0 \rightarrow \nu_s = \frac{\nu_s^0}{\gamma}$
 Rem: $\theta = \frac{\pi}{2} \rightarrow$ effet Doppler transversal
 → test exp d'interférences de Janssen et Stilwell 1938: chgt freq raies spectrales $H\alpha$ en mov rapide

$\theta = 0 \rightarrow \nu_0 = \nu_s^0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$

b) Le paradoxe des jumeaux de Langevin 1911

→ difficulté d'acceptation de la dilatat° des durées à l'arrêt de RR
 re → \rightarrow exalté paradoxal
 → en réalité, dissymétrie des situations

Battement de coeur: → même horloge biologique de la même point de vue re en comptant \pm chrono re
 durée de re pour re: T_0 durée pour que imbo chgt de freq se N chrono reus = $\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} (\frac{T_0}{2} + \frac{l}{c}) + \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} (\frac{T_0}{2} - \frac{l}{c})$ propose de v (au point de départ) re
 $= T_0 \gamma \leq T_0$
 $l = \frac{T_0 v}{2}$

→ pour re, v revient plus jeune que lui
 point de vue de v
 durée de v pour v: T_0'
 N chrono reus = $\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} (\frac{T_0'}{2}) + \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} (\frac{T_0'}{2}) = \gamma T_0' \geq T_0'$
 → pour v, v revient plus jeune que re
 Conclusion: le mètre en métrologie (acc normal) = GPS

exp Hafele - Keating 1971 horloges atomiques