

Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley

7 juin 2025

Référence

Expérience : Parler des résultats de l'article

Livre :

- Physique pour l'agrégation, FFR
- Abrégé de relativité restreinte LLG (à taper dans Google)
- On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether, Michelson et Morley (1887), American Journal of Science

Prérequis :

- Référentiel et transformation de Galilée
- Équations de Maxwell
- Interféromètre de Michelson

Niveau : Licence

Introduction

1 Limites de la mécanique newtonienne

1.1 Non-invariance des équations de Maxwell

Soit deux repères galiléen R et R' coïncidant en $t=0$ (donc $O=O'$ à $t=0$) en translation uniforme de vitesse V suivant Ox.

On peut passer d'un référentiel à l'autre par la transformation de Galilée :

$$x' = x - Vt, y' = y, z' = z \mid et \mid t' = t$$

Par le principe de relativité de Galilée, les lois de la dynamique sont invariantes par changement de référentiel galiléen.

Prenons l'exemple de la force de Lorentz :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v}_R(M) \wedge \vec{B}) = q(\vec{E}' + \vec{v}_{R'}(M) \wedge \vec{B}') = \vec{F}'$$

Or $\vec{v}_R(M) = \vec{v}_{R'}(M) + \vec{V}$, on obtient donc :

$$q(\vec{E} + \vec{v}_{R'}(M) \wedge \vec{B} + \vec{V} \wedge \vec{B}) = q(\vec{E}' + \vec{v}_{R'}(M) \wedge \vec{B}')$$

Comme cette équation doit être valable quelque soit le mouvement de M, cela implique que :

- $\vec{E}' = \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}$
- $\vec{B}' = \vec{B}$

Pendant ces résultats entrent en contradiction avec les équations de Maxwell.

Par exemple, prenons l'équation de Maxwell-Gauss : $\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

Comme la charge est invariante et les distances sont conservées, en changeant de référentiel, $\rho = \rho'$. En injectant les résultats précédents, on obtient :

$$\text{div} \vec{E}' = \text{div} \vec{E} + \text{div}(\vec{V} \wedge \vec{B}) \quad \text{div} \vec{E}' = \text{div} \vec{E} + \vec{V} \cdot \text{rot} \vec{B} \quad \text{div} \vec{E}' = \frac{\rho}{\epsilon_0} + \vec{V} \cdot \text{rot} \vec{B}$$

L'équation de Maxwell-Gauss n'est pas invariante par la transformation de Galilée.

Ce désaccord entre la mécanique newtonienne et l'électromagnétisme de Maxwell doit être corrigé ce qui implique de remettre en cause soit la mécanique newtonienne soit l'électromagnétisme de Maxwell.

Dans un premier temps, les physiciens de l'époque ne remettent pas en cause la mécanique newtonienne car c'est une théorie de longue date qui n'a pas été mise en défaut par l'expérience jusqu'alors. Ils cherchent donc à corriger les équations de Maxwell. Cependant toutes les expériences réalisées viennent consolider la théorie de Maxwell. Tout cela amène les physiciens à la fin du 19ème siècle à se concentrer sur l'étude de l'éther, milieu de propagation des ondes lumineuses théorisé deux siècles auparavant par Huygens afin de tester la validité des deux théories.

1.2 Expérience de Michelson et Morley

L'expérience repose sur le principe que la vitesse de la lumière c se compose avec celle de la source par rapport à l'éther par transformation de Galilée. Pour cela, Michelson conçoit l'interféromètre qui porte aujourd'hui son nom.

Faire un schéma du Michelson plus une image du Michelson de l'article.

On considère que la Terre est en mouvement de translation uniforme de vitesse V suivant Ox par rapport à l'éther. Par composition des vitesses, un rayon lumineux se propage dans le référentiel du laboratoire à la vitesse $c\vec{u} - \vec{V}$.

On peut donc évaluer la différence de temps de propagation des rayons lumineux de la source vers le détecteur entre les deux bras du Michelson.

Voir calcul dans le FFR p.136

On obtient ainsi une différence de marche non nulle au premier ordre sur le détecteur $\delta = D\frac{V^2}{c^2}$ avec D la longueur d'un bras.

Michelson a comparé deux situations : une où un bras de l'interféromètre est aligné avec le mouvement de la Terre et une où le dispositif est pivoté de 90° . Il s'attend à voir un décalage des franges égal à $n_{\text{décalage}} = \frac{2D}{\lambda} \frac{V^2}{c^2}$.

Parler des difficultés expérimentales rencontrées :

- premier dispositif a les bras trop courts -> décalage attendu de 0.04 interférences -> allonge artificiellement les bras pour avoir $D=11\text{m}$ et donc un décalage de 0.4 interférences
- grande sensibilité aux vibrations lors de la rotation -> installation de l'interféromètre sur un bain de mercure

Parler des résultats de l'article qui montre qu'il n'y a pas d'influence significative de la vitesse de la source sur la vitesse de la lumière et donc que l'éther semble se déplacer avec le référentiel terrestre. D'autres expériences viennent remettre en cause la transformation de Galilée (expérience de Fizeau, expérience de Trouton et Noble...)

Besoin d'une nouvelle théorie de la mécanique.

2 Relativité restreinte

2.1 Postulats d'Einstein

Einstein met en place deux postulats :

- 1er postulat : Toutes les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels inertiels
- 2ème postulat : La lumière a une vitesse (dans le vide) constante indépendante du mouvement de la source dans tous les référentiels inertiels

2.2 Transformation de Lorentz

Pour passer d'un référentiel galiléen à un autre qui coïncident en $t=0$, on utilise la transformation de Lorentz qui vérifie les postulats d'Einstein :

Mettre la transformation de Lorentz sous forme matricielle (démonstration à avoir dans un coin de la tête -> voir FFR p.140)

On définit donc $\beta = \frac{V}{c}$ et $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$

On peut s'intéresser à la limite où $V \ll c$, dans ce cas, on a $\beta \rightarrow 0$ et $\gamma \rightarrow 1$. On retrouve la mécanique newtonienne ce qui est plutôt rassurant.

2.3 Conséquences de la transformation

Voir FFR p.144 pour avoir les détails Bien faire attention aux définitions des différents événements pour ne pas dire n'importe quoi

- Simultanéité des événements
- Dilatation des durées (ex : muon atmosphérique)
- Contraction des longueurs

Parler de la loi de composition des vitesses et revenir sur les équations de Maxwell du début pour montrer que tout va bien.

Expérience quantitative

Objectif de l'expérience

Parler de l'article de Michelson et Morley

Questions & Réponses

Question : Éther, support des ondes lumineuses. Qui est le premier à avoir proposé cette notion ?

Réponse : Christiaan Huygens au 17ème siècle, dans son « Traité de la Lumière » (écrit en français, pendant son séjour à Paris, en 1678 ; publié 12 ans plus tard aux Pays-Bas). L'« éther » est un concept qui revient sans cesse en physique au fil des siècles ; toutefois, dans le cadre d'une leçon sur la relativité restreinte, on peut se cantonner à parler de l'éther de Christiaan Huygens, support des ondes lumineuses (l'éther luminifère), sans nécessairement remonter aux origines antiques (quintessence, 5e élément d'Aristote) du mot et du concept. « Luminifère », i.e. « porteur de lumière ». A rapprocher de « Lucifer » (désignation latine de la planète Vénus, le « porteur de Lumière », annonceur de l'aurore) pour l'étymologie...

Question : Propagation, le terme en c^2-v^2 ? Ça serait quoi comme solution ?

Réponse : Lorsqu'on applique la transformation de Galilée aux équations de Maxwell, en particulier à l'équation de propagation des ondes EM dans le vide, on voit apparaître un terme de propagation à la vitesse $(c-v)$ et un autre à la vitesse $(c+v)$ [cohérent avec la composition classique des vitesses ; mais l'équation de propagation n'a plus la même forme].

Question : Sources de lumière de Michelson-Morley ?

Réponse : Lampe au sodium (en fait « flamme au Sodium ») d'abord puis en lumière blanche (lampe « Argand » i.e. lampe à huile, blanche).

Question : Pourquoi la lampe au sodium ? Quel est l'intérêt ?

Réponse : Doublet jaune, quasi-monochromatique. Permet le réglage de l'interféromètre. Notamment pour l'alignement des miroirs et pour obtenir les franges, et rechercher le contact optique.

Question : Qu'est-ce qui se passe en lumière blanche ? A quoi ressemble la figure d'interférences ?

Réponse : Superposition des interférences pour chaque λ . En lumière blanche, Michelson obtient une frange sombre centrale, quelques franges blanches, puis des franges colorées qui se brouillent rapidement de part et d'autre de la frange sombre centrale.

Question : Utilité du bain de mercure ?

Réponse : Grande densité donc le marbre flotte dessus. Permet de faire lentement tourner le marbre, en limitant les vibrations qui rendraient difficilement observable l'évolution attendue du motif d'interférences pendant la rotation.

Question : Quelle est l'utilité de la lame compensatrice ?

Réponse : Pour compenser la différence de chemin optique dans le verre (de la lame semitransparente) entre les deux bras.

Question : Pourquoi 6 mois plus tard pour la manip ?

Réponse : Pour vérifier le mouvement de l'éther par rapport à la Terre lorsque celle-ci se déplace (à 30 km/s) dans la direction opposée.

Question : Connais-tu d'autres expériences ayant pour objectif la mise en évidence du vent d'éther ?

Réponse : Expérience de Fizeau (question de l'entraînement (ou non, ou partiel) de l'éther par les milieux transparents en mouvement). Autre expérience conçue afin de mettre en évidence le « vent d'éther » : l'expérience de Trouton et Noble (un condensateur plan chargé, suspendu à un fil de torsion, est sensé pivoter de telle sorte que les plaques s'orientent perpendiculairement au « vent d'éther »).

Question : Est-ce que tu peux préciser ce que Michelson veut mesurer en faisant tourner le marbre ?

Réponse : Inversion du signe de la différence de chemin optique entre les deux bras de l'interféromètre lorsqu'il pivote de 90° , qui doit induire un décalage du motif des franges.

Question : En quoi les postulats d'Einstein résolvent les résultats de l'expérience de Michelson et de Morley ? Et si l'éther au voisinage de la Terre était entraîné par la Terre dans son mouvement ?

Réponse : Si la lumière se propage à la célérité c dans tous les référentiels inertiels, on n'attend aucune différence de marche du fait du mouvement de la Terre entre les bras de l'interféromètre, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux. Si une couche d'éther se déplaçait avec la Terre dans son mouvement autour du soleil, cela rendrait compte du résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley, mais ce serait incohérent avec l'interprétation classique de l'aberration des étoiles, interprétée alors comme la composition (addition classique des vecteurs vitesses) du mouvement de la lumière (dans l'éther) avec le mouvement de la Terre (dans l'éther).

Question : Est-ce que tu saurais préciser sous quelles hypothèses la transformation de Lorentz (telle que formulée) est valable ? Idem, hypothèses lorsque tu as écrit la transformation de Galilée ?

Réponse : [Le manque de précision lors de l'écriture de la transformation de Lorentz au tableau a suscité ces questions]. Sous la forme utilisée, on suppose que les origines O et O' des deux référentiels R et R' se confondent à $t=t'=0$ (synchronisation des origines des temps lors de l'événement particulier $O=O'$), sans quoi il est nécessaire d'ajouter des termes constants dans les équations de Lorentz. Il est important d'être précis et de bien prendre le temps de dessiner les deux référentiels, les axes, de poser les hypothèses, de préciser que O et O' se confondent à $t=t'=0$, etc.

Question : Est-ce que ce n'est pas restrictif de ne considérer pour le mouvement de référentiel qu'une translation sur l'axe des x ? N'y a-t-il pas là perte de généralité ?

Réponse : L'ensemble des transformations qui laissent invariantes les équations de Maxwell forment le « groupe de Poincaré » ; sa base canonique est constituée des translations dans l'espace et dans le temps, des rotations, du renversement du temps et de la parité, et des « boost » de Lorentz sur les 3 axes. Lorsqu'on écrit la transformation de Lorentz en supposant le mouvement relatif entre les référentiels selon Ox et $O'x'$, il n'y a pas nécessairement perte de généralité : dans les référentiels inertiels R et R' considérés, on peut toujours choisir les axes de telle sorte que l'axe Ox (et l'axe $O'x'$) soient orientés selon le mouvement relatif entre les 2 référentiels.

Question : Qu'est-ce que le « temps propre », définition ? Si on prend un mobile pour lequel deux événements ont lieu successivement pour lui dans son référentiel propre, quelle sera la durée qui sépare ces deux événements dans un autre référentiel ?

Réponse : Temps/durée mesurée entre des événements ayant lieu au même point dans le référentiel où le mobile est au repos. Dans tout autre référentiel, on trouvera entre les mêmes événements une durée plus longue : c'est la « dilatation du temps ».

Question : Dans la célèbre expérience sur les muons atmosphériques : à quoi correspond le temps de vie du muon de 2.2 microsecondes ? Si jamais j'avais une population de muons « dans une boîte », comment cette population évoluerait-elle ?

Réponse : Temps de vie moyenne. Loi exponentielle décroissante. En physique des particules, on donne en général le temps de vie moyen d'une particule, noté τ . Il s'agit bien sûr du temps de vie moyen mesuré « au repos », i.e. dans le référentiel propre de la particule (temps propre). Pour une population de particules semblables, la population de ces particules évoluera selon : $N(t) = N(0) \exp(-t/\tau)$.

Question : Retour sur les effets de la transformation de Lorentz sur les longueurs, validité de l'équation obtenue pour la longueur de la règle dans l'autre référentiel ?

Réponse : La longueur d'un objet (selon la direction du mouvement relatif entre les 2 référentiels considérés) mesurée dans le référentiel où il est au repos est sa « longueur propre ». Dans tout autre référentiel, on trouvera une longueur plus courte : c'est la « contraction des longueurs ». Lors du calcul, il est essentiel de bien définir les événements considérés, et de se souvenir que du point de vue opérationnel, on définit une mesure de longueur comme la détermination simultanée des abscisses des deux extrémités de l'objet, au même instant dans le référentiel où on effectue la mesure. Sans ces précautions, surtout en raisonnant sur des intervalles de temps et d'espace mal définis, on aboutit parfois au résultat inverse de ce que la relativité prédit [La question est venue car le calcul présenté au tableau était erroné et aboutissait au résultat inverse de ce que prédit la théorie de la relativité. Une telle erreur lors de l'épreuve devant le jury de l'agrégation serait très certainement « fatale » pour la/le candidat(e)].

Question : Tu as évoqué la vitesse c comme une limite infranchissable ; as-tu déjà entendu parler des tachyons ? c.à.d. des particules hypothétiques, qui, par définition, se déplaceraient à une vitesse supérieure à c ? A quoi ressemblerait leurs lignes d'univers dans un diagramme d'espace-temps ?

Quelles seraient les conséquences pour un tachyon ? Peux-tu rappeler ce qu'est le cône de lumière d'un événement, le dessiner, et rappeler à quoi correspondent les différentes régions que délimite le cône de lumière ?

Réponse : Le tachyon est, par définition, une particule (hypothétique) qui se déplacerait plus vite que la lumière. On peut montrer qu'un tachyon doit nécessairement se déplacer plus vite que la lumière dans tous les référentiels inertiels. La pente de sa ligne d'univers est telle que pour n'importe quel point-événement de sa ligne d'univers, son futur et son passé sont hors de son cône de lumière, ce qui pose de sévères questions concernant le principe de causalité pour le tachyon. On peut aussi montrer qu'il est toujours possible de trouver un référentiel inertiel tel que émission et réception d'un tachyon voient leur ordre temporel inversé. Pour le cône de lumière d'un événement, la partition de l'espace-temps associée, et la discussion sur le signe de l'intervalle d'espace-temps pour une paire d'événements, se référer à l'abrégé de cours par exemple.

Question : Est-ce que tu saurais retrouver la nouvelle loi de composition des vitesses par les transformations de Lorentz ? Quelle différence avec la loi galiléenne ? Imaginons un rayon lumineux allant à c selon $+x$ dans R , à quelle vitesse se propage-t-il dans R' ?

Réponse : L'objectif de la question était de retrouver la loi relativiste de composition des vitesses (au moins pour la composante selon x/x'), de l'appliquer au cas particulier d'un rayon lumineux se propageant selon $+x$ ou $-x$, et de vérifier qu'on obtient bien un résultat cohérent avec les postulats d'Einstein, à savoir que la lumière se propage à la célérité c dans tous les référentiels galiléens/inertiels.