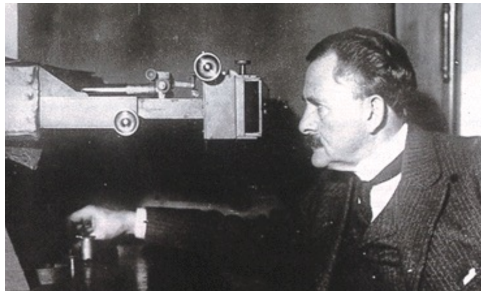
Physique Avancée IV Semestre de printemps 2025

# Semaines 11

# 8 et 9 mai 2025

2.3.1 Champ E.M. au passage d'une interface
2.3.2 La biréfringence

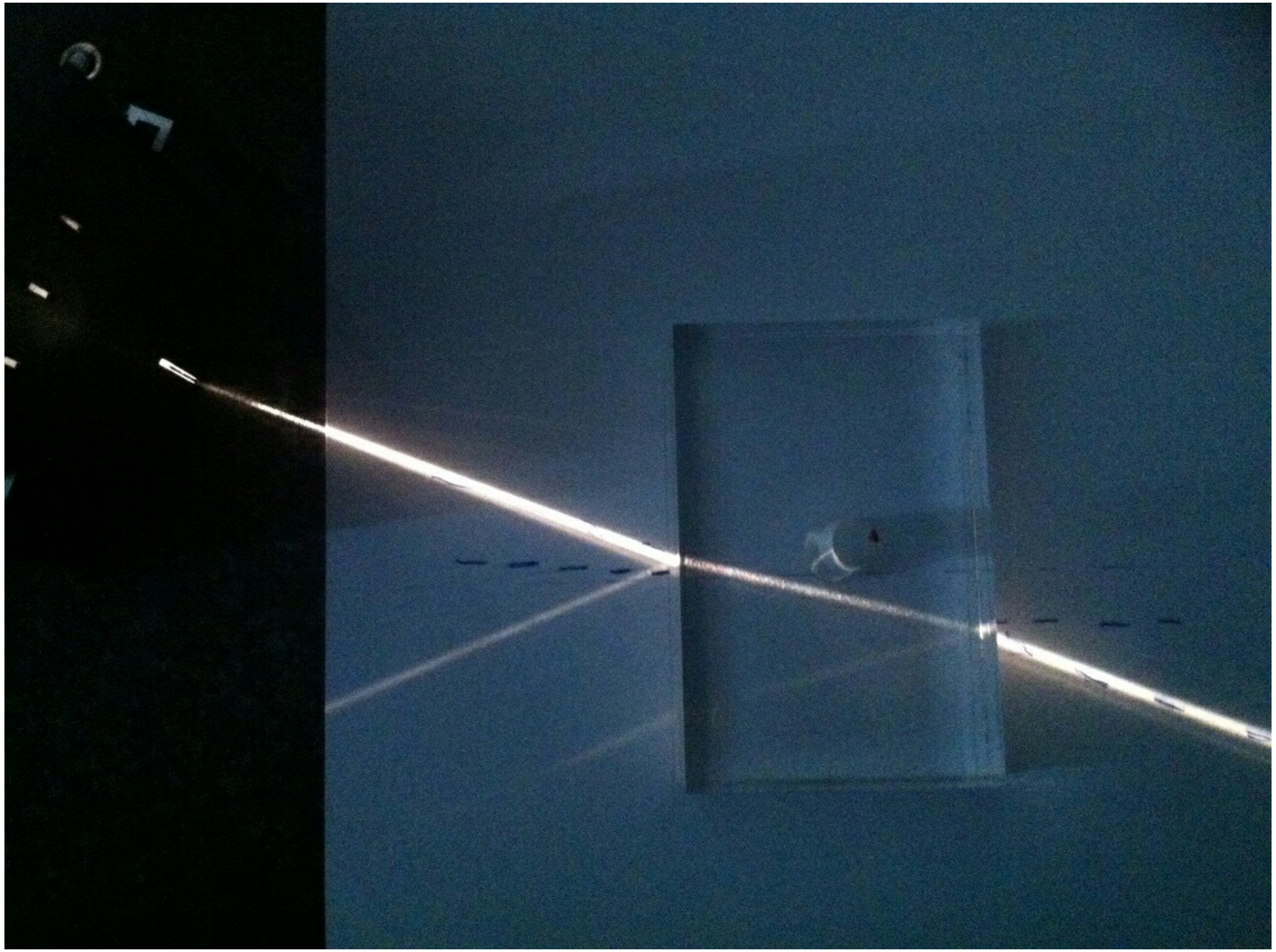
3. La relativité restreinte
3.1 Introduction
3.1.1 Relativité galiléenne
3.1.2 Difficultés liées à la relativité galiléenne et la vitesse de la lumière
3.1.3 L'expérience de Michelson et Morley
3.1.4 Principes de la relativité restreinte
3.1.5 Conséquences des principes de la relativité restreinte


Albert A. Michelson
(1852–1931)


Edward W. Morley
(1838–1923)

Série 10

# 2.3 Réflexion et réfraction des ondes E.M.



# 2.3.1 Champ E.M. au passage d'une interface (milieux diélectriques isotropes)

Incidence parallèle:

$$T_{\parallel} = \left(\frac{E_{0,T}}{E_{0,I}}\right)_{\parallel} = \frac{2\cos\theta_I \sin\theta_T}{\sin(\theta_I + \theta_T)\cos(\theta_I - \theta_T)}$$

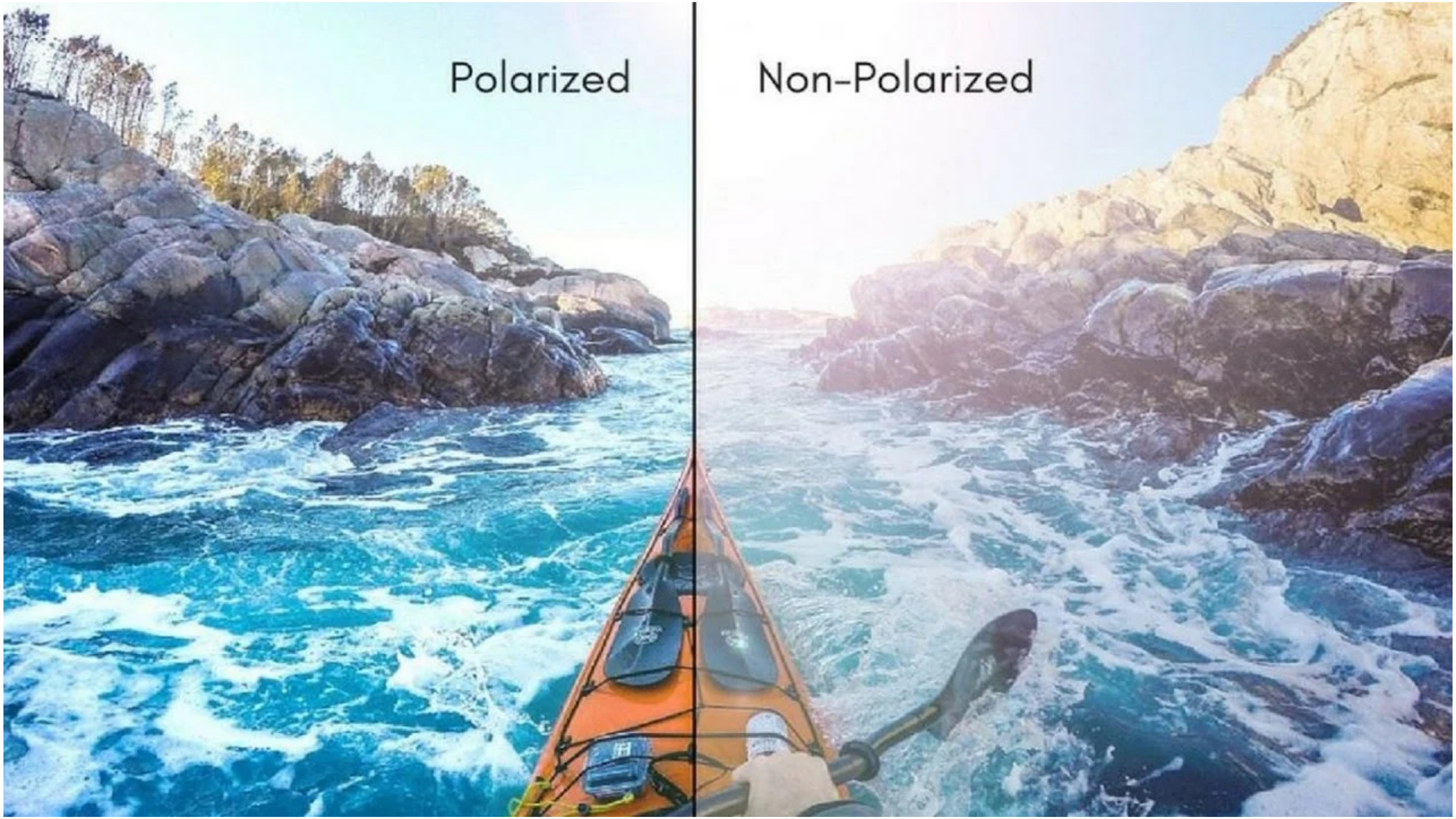
$$R_{\parallel} = \left(\frac{E_{0,R}}{E_{0,I}}\right)_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_T - \theta_I)}{\tan(\theta_I + \theta_T)}$$

Incidence perpendiculaire:

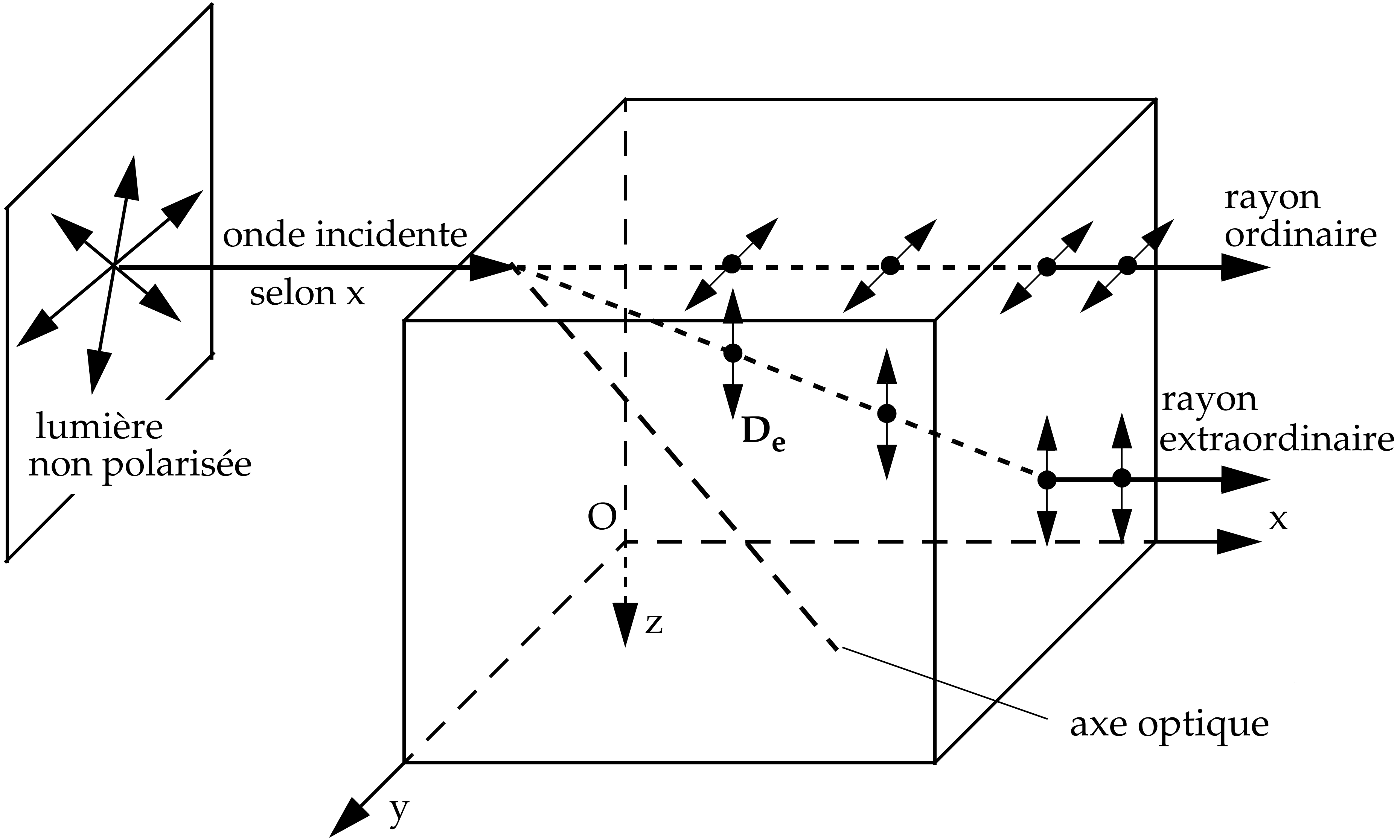
$$T_{\perp} = \left(\frac{E_{0,T}}{E_{0,I}}\right)_{\perp} = 2\frac{\cos\theta_I \sin\theta_T}{\sin(\theta_I + \theta_T)}$$

$$R_{\perp} = \left(\frac{E_{0,R}}{E_{0,I}}\right)_{\perp} = \frac{\sin(\theta_T - \theta_I)}{\sin(\theta_I + \theta_T)}$$

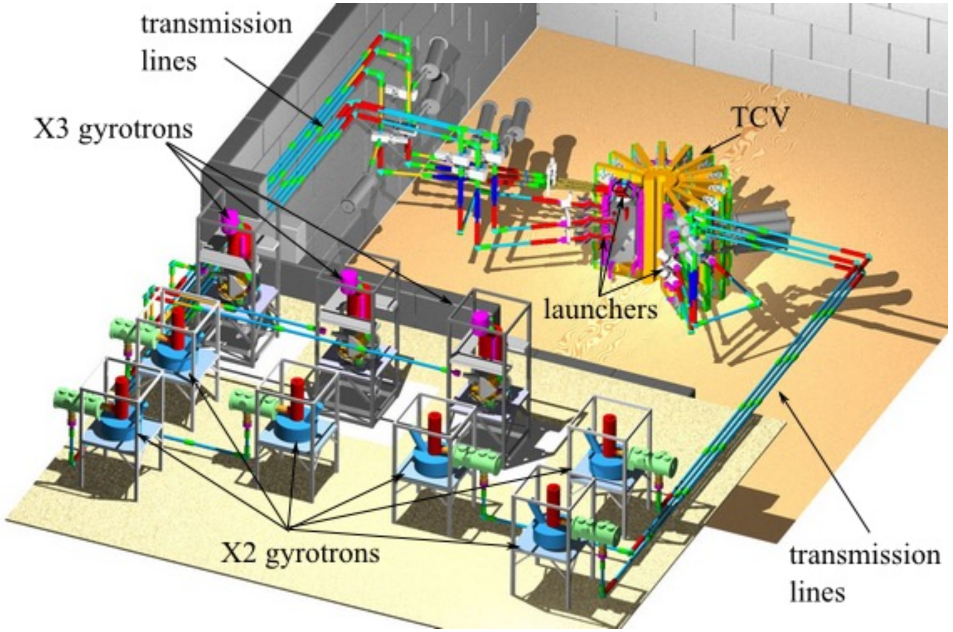
$$\theta_I \simeq \pi/2$$

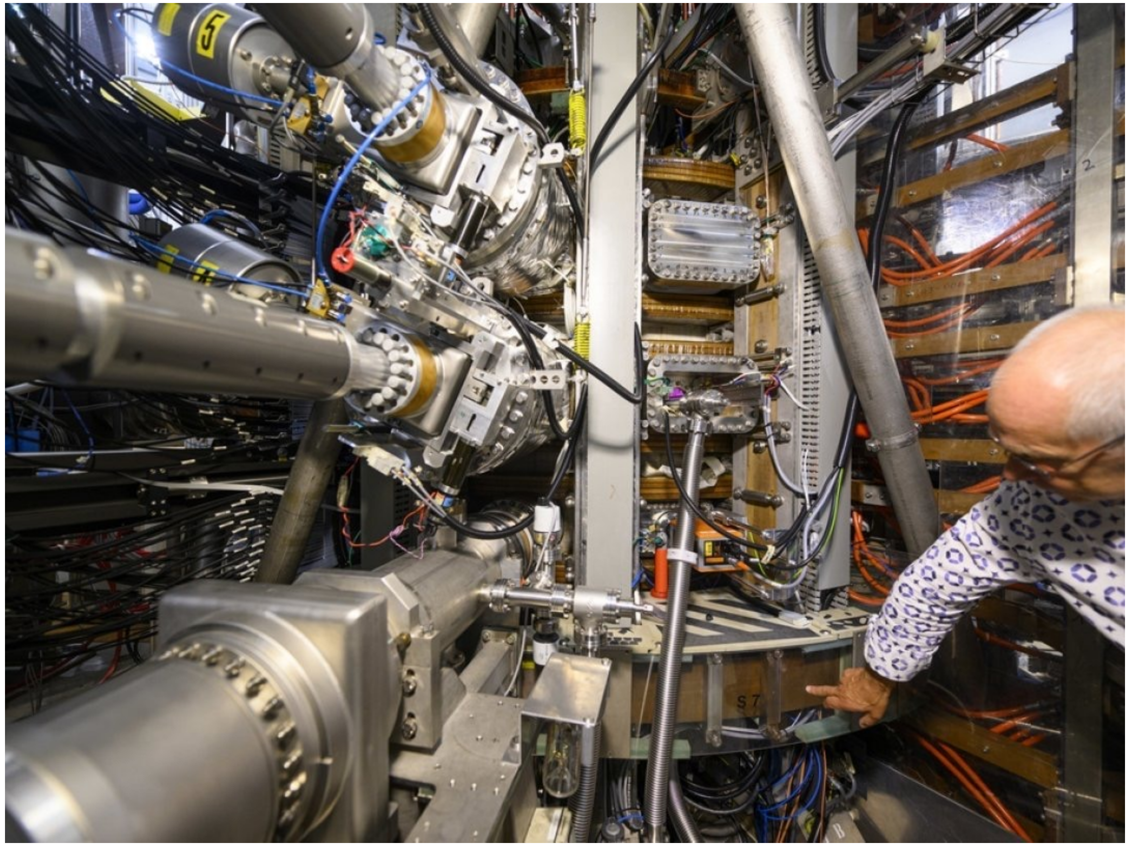

Polarized
Non-Polarized

# 2.3.2 La biréfringence



# 2.3.3 Propagation guidée des ondes E.M.



# 3. La relativité restreinte

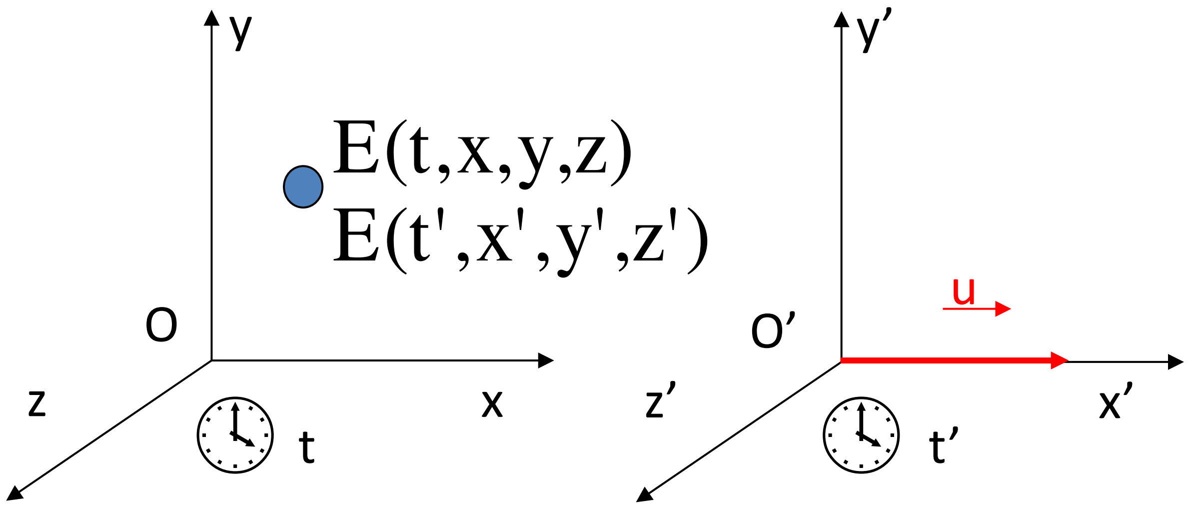
## 3.1 Introduction

# 3.1.1 Relativité galiléenne

Absolute, true and mathematical time, of itself, and from its own nature flows equably without regard to anything external, and by another name is called duration....

Absolute space, in its own nature, without regard to anything external, remains always similar and immovable...

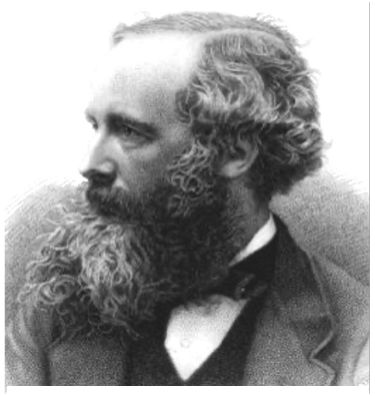
Sir Isaac Newton, Philosophiae Naturalis
Principia Mathematica, 1687




$$\boxed{\begin{aligned} t' &= t \\ x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}}$$

transformation
de Galilée

# 3.1.2 Difficultés liées à la relativité galiléenne



James C. Maxwell
(1831–1879)

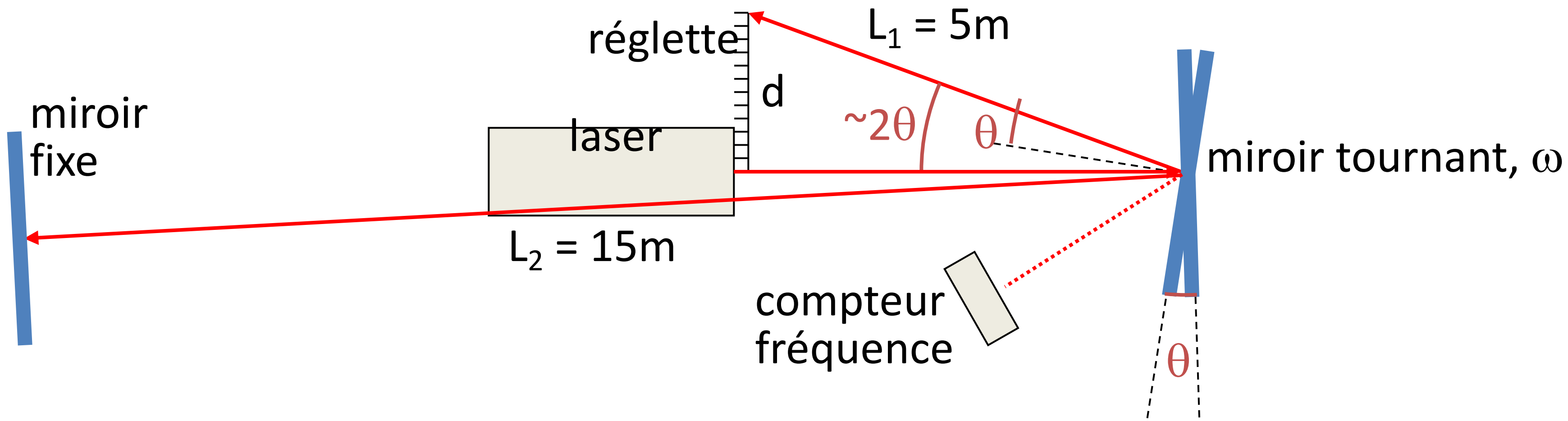
1) Force de Lorentz

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

2) Vitesse de la lumière

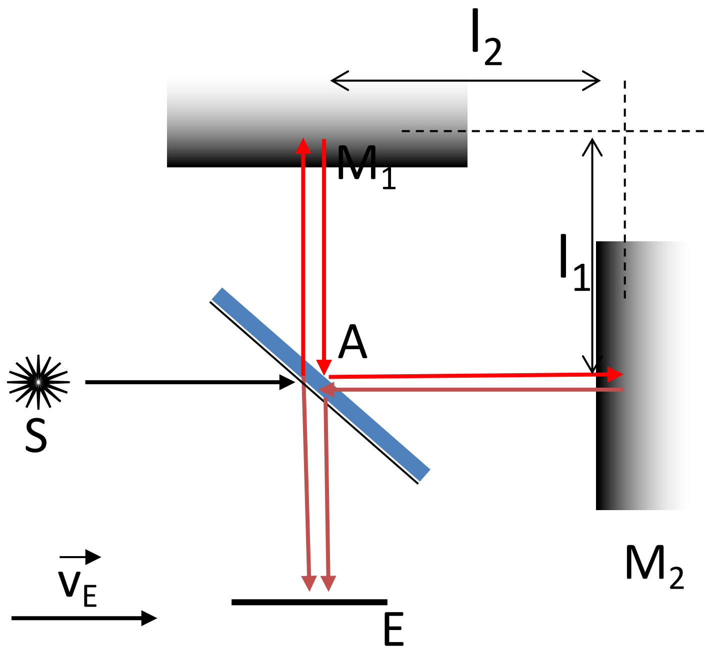
$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \cong 3 \cdot 10^8 \, m/s$$

# La mesure de la vitesse de la lumière

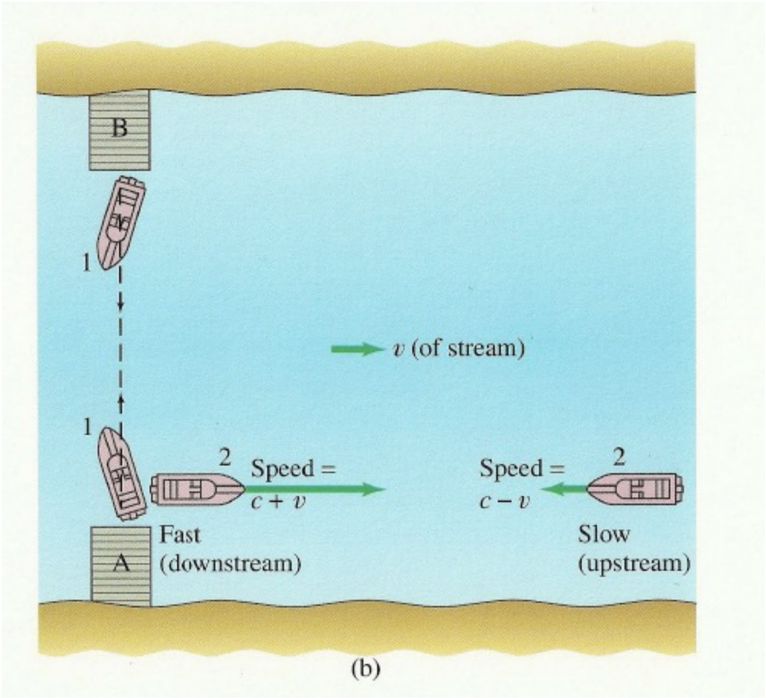


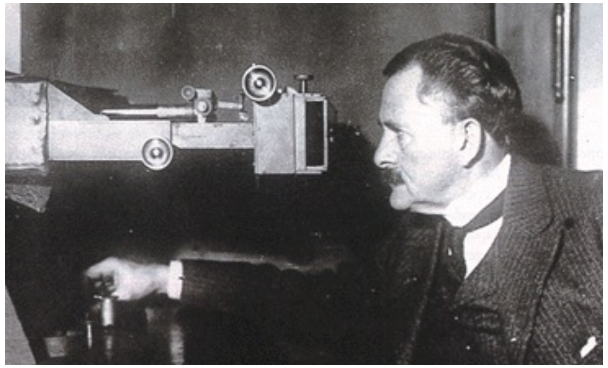
# 3.1.3 Une possible solution: l'éther.

## L'expérience de Michelson et Morley




(vue de dessus)



Albert A Michelson (1852–1931)

Edward W. Morley (1838–1923)

# 3.1.4 Principes de la relativité restreinte

# Les postulats de la relativité restreinte

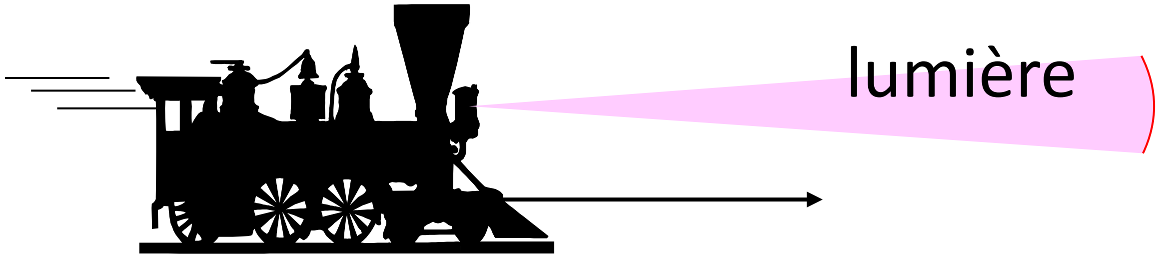
## 1er postulat

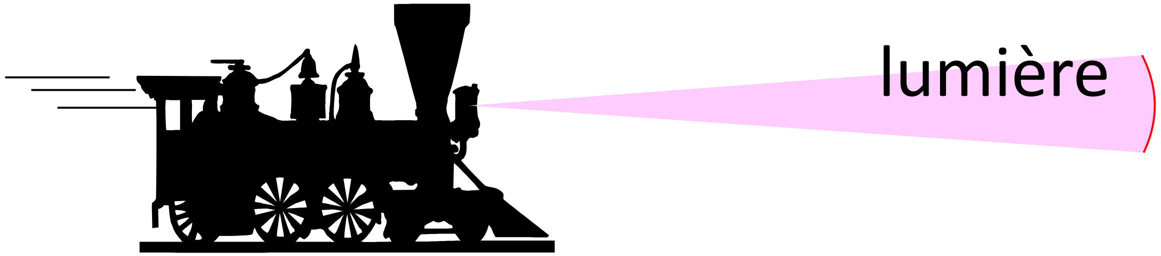
$\boxed{\text{Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels d'inertie}}$

## 2ème postulat

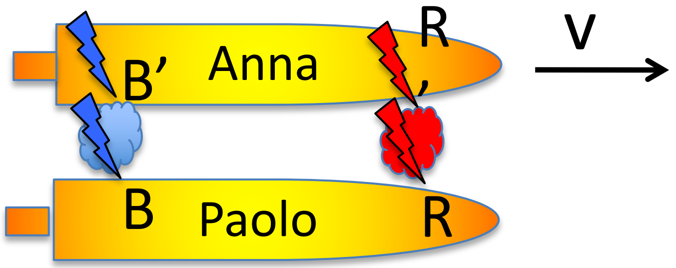
$\boxed{\text{La vitesse de la lumière dans le vide, c, est indépendante du référentiel (observateur) et du mouvement de la source}}$

# 3.1.5 Conséquences des principes de la relativité: addition des vitesses

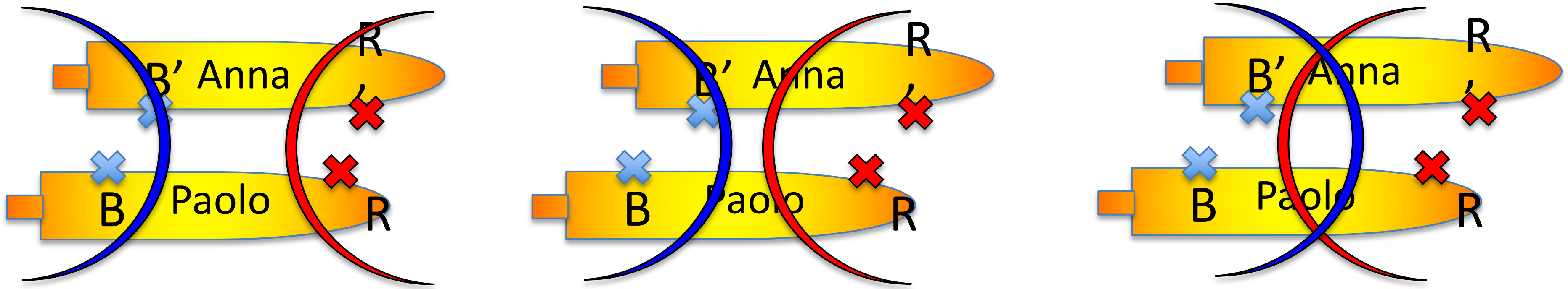


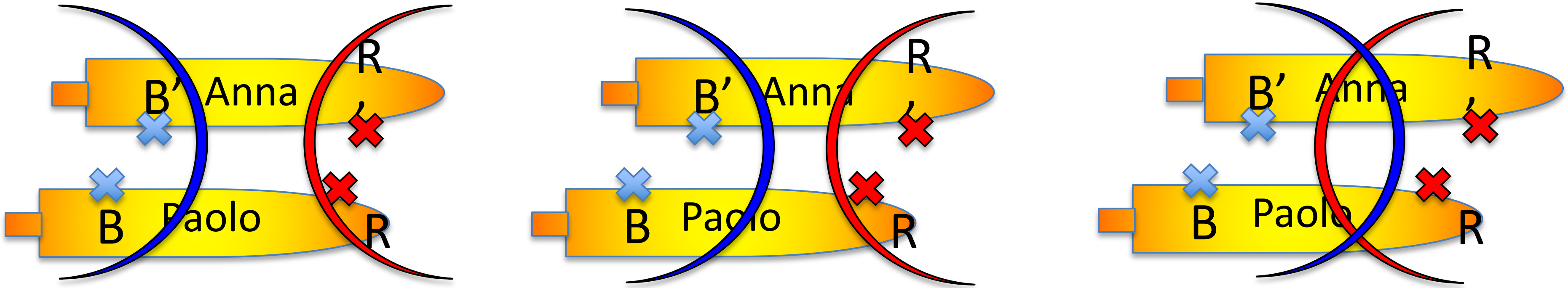
# 3.1.5 Conséquences des principes de la relativité: simultanéité



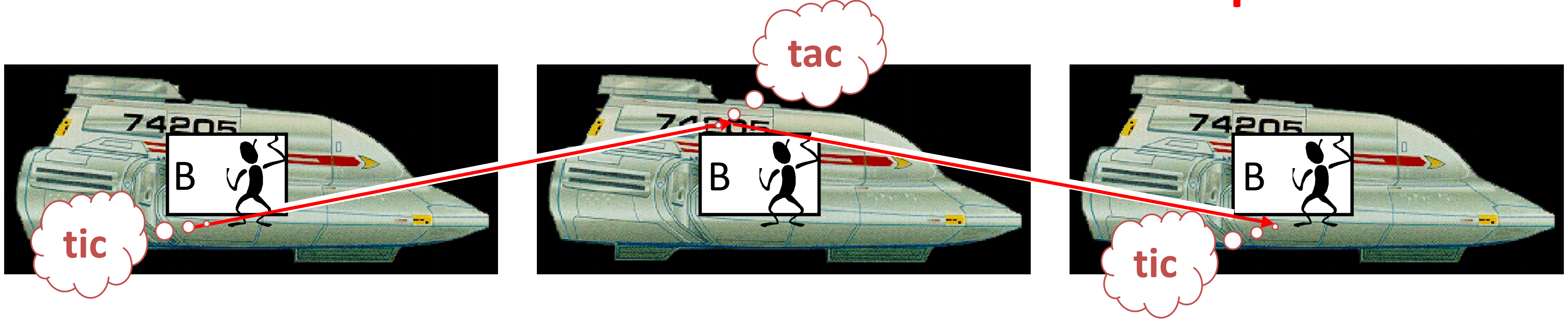

Référentiel de Paolo:




Référentiel de Anna:

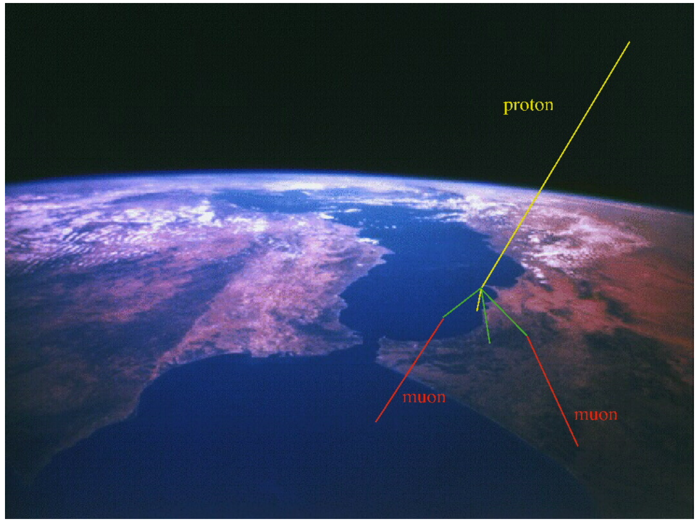


# 3.1.5 Conséquences des principes de la relativité: dilatation du temps




Applications…

Muons:




Jet:

Série 10



*9 mai 2025*

# Série 10 : Relativité restreinte, contraction des longueurs et dilatation du temps

## 1 Invariance des équations de Maxwell (partie 1)

Dans le vide, les champs électrique $\mathbf{E}$ et magnétique $\mathbf{B}$ satisfont les équations d'onde

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{E} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{B} = 0.$$

En définissant l'opérateur d'alembertien $\Box = \partial^2/\partial(ct)^2 - \nabla^2$, l'équation d'onde s'écrit, par exemple pour $\mathbf{E}$ :

$$\Box \mathbf{E} = 0. \qquad (*)$$

On désire trouver quelle transformation laisse l'équation d'onde des champs électromagnétiques invariante.

(a) On commence par considérer un référentiel $\mathcal{R}'$ en mouvement rectiligne uniforme le long de l'axe $\mathbf{e}_x$ avec une vitesse $v$ par rapport à un référentiel $\mathcal{R}$ de coordonnées $(t, \mathbf{x})$ dans lequel l'équation $(*)$ est satisfaite. En utilisant les transformations galiléennes, réécrivez l'équation d'onde en termes des coordonnées $(t', \mathbf{x}')$ de $\mathcal{R}'$.

(b) Conclure qu'il est impossible de transformer le champ $\mathbf{E}$ dans $\mathcal{R}$ en un champ $\mathbf{E}'$ dans $\mathcal{R}'$ de sorte que l'équation d'onde soient invariante. On considèrera uniquement les transformations linéaires inversibles $\boldsymbol{C} \in \mathbb{R}^{3\times 3}$, $\mathbf{E}' = \boldsymbol{C}\mathbf{E}$, indépendantes des coordonnées spatio-temporelles.

Dans la deuxième partie de cet exercice, qui sera abordée dans la série de la semaine prochaine, on montrera qu'une transformation de Lorentz laisse l'équation d'onde électromagnétique invariante.

## 2 Fusée relativiste

Un observateur $S$ est sur une plateforme de longueur $D_0 = 65$ m, dans une station spatiale. Une fusée passe à une vitesse relative $u = 0.8c$ parallèle au côté de la plateforme. L'observateur $S$ remarque qu'à un certain instant, l'avant et l'arrière de la fusée passent simultanément en face des deux extrémités de la plateforme.

(a) Selon $S$, quel intervalle de temps s'écoule-t-il entre les instants auxquels l'avant et l'arrière de la fusée passent devant lui ?

(b) Quelle est la longueur propre $L_0$ de la fusée ?

(c) Pour un observateur $S'$ se situant dans la fusée, quelle est la longueur $D$ de la plateforme ?

(d) Pour $S'$, combien de temps cela prend-il pour que l'observateur $S$ passe d'un bout à l'autre de la fusée ?

(e) Selon $S$, les deux extrémités de la fusée s'alignent simultanément avec les deux extrémités de la plateforme. Ces deux événements sont-ils également simultanés pour $S'$ ?

## 3 Cinématique relativiste

Une barre de longueur $l$ voyage dans la direction $Ox$ à une vitesse $v$ par rapport à un référentiel $\mathcal{R}$. Dans son référentiel propre $\mathcal{R}'$, cette barre est inclinée d'un angle $\theta_0$ par rapport à l'axe $Ox$. Quelle doit être sa vitesse pour que, dans $\mathcal{R}$, elle ait un angle d'inclinaison $\theta = \pi/4$ ?