Les preuves empiriques élémentaires de la théorie de la relativité restreinte

Autor(en): **Schidlof, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Archives des sciences physiques et naturelles**

Band (Jahr): **4 (1922)**

PDF erstellt am: **25.07.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-741969

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

1922 Vol. 4. Septembre-Octobre.

LES PREUVES EMPIRIQUES ÉLÉMENTAIRES

DE LA

THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

PAR

A. SCHIDLOF

(Avec 1 fig.)

L'enchaînement d'idées sur lequel repose la théorie de la relativité restreinte a été développé dès le début par A. Einstein[1] avec une telle perfection que depuis lors tous les auteurs ont dû se borner à suivre la même route à des modifications insignifiantes près. Il est d'ailleurs en général avantageux, lorsqu'on expose une théorie, de respecter l'ordre historique qui se confond le plus souvent avec l'ordre logique. Je proposerai ici une seule petite infraction à cette règle, uniquement pour mieux montrer combien les progrès de la physique expérimentale ont consolidé la charpente de la théorie. Au moment où Einstein établit la théorie, la voie qu'il suivait était la seule accessible; il manquait en effet, à cet instant, le dernier chaînon des preuves élémentaires. En y suppléant par le raisonnement pur il montra la force de son intuition. A l'heure qu'il est, la transformation de Lorentz est directement vérifiable, au degré de précision de la technique expérimentale actuelle. Pourquoi ne pas en profiter, et substituer aux déductions abstraites le support solide des preuves empiriques ?

1. La notion même de la relativité du mouvement est imposée à l'esprit par la logique, mais la restriction du principe de

[1] A. Einstein. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Ann. der Phys.* *17* (1905).

relativité à une classe particulière de systèmes de référence chrono-spatiaux, et surtout le choix d'une loi devant s'appliquer sous la même forme à tous les systèmes enlèvent à cette idée une partie de sa certitude théorique.

En admettant l'hypothèse de l'équivalence de tous les points chrono-spatiaux, adoptée par Einstein à l'instar des théories antérieures, et en appelant « système galiléen » un système de référence usuel animé d'un mouvement rectiligne et uniforme, on peut énoncer le principe fondamental de la théorie de la relativité restreinte comme suit:

I. *En chaque point chrono-spatial et par rapport à n'importe quel système de référence galiléen les lois naturelles ont la même forme.*

J'appellerai ce premier principe le « *principe abstrait* ». On peut en conclure que les lois naturelles s'expriment par des équations qui sont covariantes vis-à-vis d'une certaine transformation des coordonnées x, y, z et du temps t. Les systèmes de référence en question étant cartésiens et animés d'une translation rectiligne et uniforme, les équations de transformation doivent être linéaires et homogènes dans une multiplicité à 4 dimensions. Ce ne sont pas nécessairement les équations de Lorentz, car le principe abstrait ne détermine pas les paramètres constants des équations de transformation.

Le choix particulier de l'expression mathématique des lois naturelles fait disparaître l'indétermination. Si ces lois sont, par exemple, les équations de Maxwell-Lorentz, qui sont covariantes vis-à-vis de la transformation de Lorentz, l'invariant quadratique fondamental de la transformation présente la forme

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \tag{1}$$

où c, la vitesse de la lumière dans le vide, est un paramètre constant. Pour cette raison Einstein a basé sa théorie sur le principe suivant:

II. *La vitesse de la lumière dans le vide est constante, c'est-à-dire indépendante du mouvement de la source.*

Bien plus proche de la réalité tangible que le principe I, ce second principe ne s'impose pas avec la même nécessité; il est, par exemple, en contradiction avec les idées de Newton sur la propagation de la lumière, mais, ce qui est plus grave, l'extension, logiquement nécessaire, du principe de relativité à des systèmes de référence non galiléens montre que la vitesse de la lumière varie dans certaines conditions. Cela pourrait faire paraître bien douteux le principe II, s'il n'était pas appuyé par des raisons *empiriques* particulièrement importantes.

Si l'on admet le principe II, toutes les conséquences qu'en a tirées Einstein s'imposent: sa notion de la simultanéité de deux événements, la différence entre la forme « géométrique » et « cinématique » d'un même corps, l'inégalité des mêmes durées observées à l'aide de deux horloges animées de vitesses différentes, la variation de la masse avec la vitesse, et l'inertie de l'énergie.

La simplicité et l'élégance mathématique de la théorie d'Einstein, mises en évidence surtout par Minkowski, rendent ces conceptions très séduisantes, mais ne sont pas suffisantes pour faire oublier aux physiciens les idées encore plus simples sur la nature de l'espace et du temps dont on s'est contenté pendant des siècles. On comprend donc que théoriciens et expérimentateurs aient toujours de nouveau soumis à l'examen les points de départ de la théorie.

Le principe abstrait ne prête pas le flanc à la critique, mais il n'en est pas de même, nous l'avons vu, du principe de constance de la vitesse de la lumière. Peut-être les équations de Maxwell ne sont-elles pas l'expression parfaite des lois naturelles. En les abandonnant on n'a plus aucune raison pour attribuer une signification fondamentale à la transformation de Lorentz, soit au principe II qui en résulte.

Dans ce qui suit nous admettons *a priori* le *principe abstrait* d'après lequel les mesures des longueurs, des durées, des effets dynamiques peuvent dépendre du système de référence, mais nous demandons à l'expérience l'expression des équations de transformation.

2. Je me propose de montrer que dans l'état actuel de nos connaissances les équations de Lorentz n'expriment que des faits empiriques élémentaires des mieux établis. Chacune de ces équations est susceptible d'une vérification complète.

Désignons par x, y, z, t, respectivement x', y', z', t' les variables spatiales et le temps rapportés, selon le cas, à l'un ou à l'autre des deux systèmes de référence galiléens S et S'. L'axe des x indique la direction suivant laquelle a lieu le mouvement relatif des deux systèmes en question. On utilise des axes rectangulaires, orientés parallèlement dans les deux cas.

L'ensemble des faits expérimentaux de l'optique des corps en mouvement conduit à l'abandon de la notion de simultanéité de l'ancienne cinématique. Une modification de la définition du temps, suivant l'état de mouvement du système de référence a été reconnue nécessaire par H.-A. Lorentz[1] indépendamment de l'idée de la relativité et longtemps avant Einstein. Soit t' le temps marqué par les horloges qui prennent part au mouvement d'un certain système de référence galiléen S', t le temps marqué par d'autres horloges reliés à un autre système S, par rapport auquel le premier a la vitesse v dans la direction positive de l'axe des x, l'expérience fournit une relation de la forme

$$t' = \beta\,(t - \alpha\, x)\ .$$

A vrai dire, pour H.-A. Lorentz le système S n'était pas un système de référence quelconque, mais lié à l'éther, milieu dans lequel se propage la lumière avec la vitesse c. β et α sont deux constantes positives, fonctions de la vitesse v du système S'. L'absence de toute influence du mouvement de la terre sur la vitesse apparente de propagation de la lumière émise par les sources terrestres s'explique en attribuant à la constante α la valeur :

$$\alpha = \frac{v}{c^2}$$

v étant la vitesse de la terre (système S').

Une autre interprétation, ne faisant pas intervenir le temps t', paraît plus naturelle à première vue. En se servant d'une théorie d'émission, on peut admettre que la vitesse des sources et miroirs se communique complètement aux particules lumi-

[1] H. A. Lorentz. Versuch einer Theorie der elektr. und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. Leyde. 1895.

neuses, mais cette théorie se heurte à des difficultés insurmontables, si l'on cherche à expliquer l'influence d'un corps transparent en mouvement sur la propagation de la lumière. La théorie de Lorentz par contre résout ce problème d'une façon fort satisfaisante. Elle interprète quantitativement l'expérience de Fizeau de l'entraînement *partiel* des ondes lumineuses par un courant d'eau, ainsi que l'aberration astronomique.

Quant au facteur β, l'expérience prouve que, même pour des vitesses astronomiques, sa valeur empirique est très voisine de 1.

Il subsiste une objection grave contre la théorie de Lorentz, celle d'introduire un système de référence fictif lié à « l'éther ». Ce système n'est pas le même dans le cas où il s'agit de la terre, et où l'éther est supposé en repos par rapport au soleil ou aux étoiles, et dans le cas du courant d'eau (expérience de Fizeau) où l'éther est immobile par rapport à la terre. En fait, la formule s'applique bien au mouvement relatif de deux systèmes matériels quelconques, et l'expérience prouve que c'est la même constante c qui intervient dans tous les cas, constante à laquelle on peut bien attribuer la signification de la vitesse de propagation de la lumière par rapport à l'un ou à l'autre des deux systèmes.

3. Il existe une seule expérience de l'optique des corps en mouvement dont l'explication échappe à la formule de Lorentz, c'est l'expérience de Michelson et Morley[1]. Elle fournit par contre, à elle seule, la loi complète de transformation des variables spatiales x, y, z.

Rappelons brièvement cette expérience en considérant, à la place du dispositif réel, un appareil schématique légèrement simplifié:

Deux faisceaux lumineux parcourent l'un le trajet ABD, l'autre le trajet ACD, indiqués sur le croquis ci-joint, et interfèrent finalement en D. Les deux trajets sont réalisés successivement au moyen des mêmes appareils orientés, tantôt l'un, tantôt l'autre, dans la direction du mouvement de la terre.

[1] A. A. Michelson et E. W. Morley. *Americ. Journ. of Sc.* (3), *34* (1887). *Phil. Mag.* (5), *24* (1887).

Soit λ_l la longueur du bras de l'interféromètre orienté parallèlement au mouvement de la terre, λ_t la longueur du bras perpen-

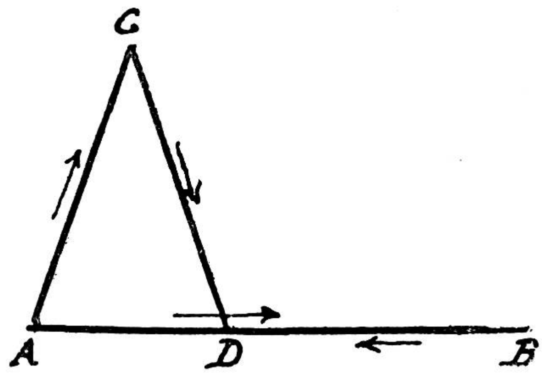

Fig. 1.

diculaire. Un calcul connu fournit pour la durée du parcours « longitudinal » ABD

$$\tau_l = \frac{2\lambda_l}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)},$$

v étant la vitesse de translation de la terre. La durée du parcours « transversal » ACD est:

$$\tau_t = \frac{2\lambda_t}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Selon l'expérience il n'y a aucune différence entre les deux durées si les deux bras de l'interféromètre sont identiques. Or, si ces deux bras avaient, dans le système en mouvement, la même longueur on aurait $\tau_l > \tau_t$. La question du réglage des horloges n'intervient pas dans l'interprétation de cette expérience, parce que les deux durées écoulées sont marquées par la même horloge du système de référence, par celle qui se trouve à l'endroit où l'on observe les interférences.

La seule explication possible de l'égalité des deux durées constatée expérimentalement est celle donnée par Lorentz et Fitzgerald[1]. Le bras orienté dans la direction du mouvement

[1] H. A. LORENTZ, *l. c.* et *Proceed. Sc. Amsterdam*, *6*, 1904, p. 809.

subit une contraction proportionnelle à $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$. Les deux durées sont donc égales parce qu'on a:

$$\lambda_l = \lambda_t \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} .$$

Il faut évidemment tenir compte de cette contraction pour établir l'accord entre les mesures des longueurs faites dans le système S′ et dans le système S. Cela se fait d'une façon purement phénoménologique au moyen des équations de transformation:

$$\left.\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

auxquelles nous joignons la formule précédente:

$$t' = \beta\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) . \qquad (3)$$

Ces équations ne sont autre chose que des relations empiriques tenant compte de tous les faits observés et basées sur l'idée que la vitesse de la lumière est la même par rapport à n'importe quel système galiléen. Elles reçoivent une signification théorique, comme l'a remarqué Einstein, seulement si on les considère comme des équations de transformation correspondant au principe de relativité abstrait. Toutefois, pour que ce principe soit compatible avec le principe de constance de la vitesse de la lumière, l'expression (1) doit être l'invariant quadratique fondamental de la transformation. Cette condition détermine la valeur du coefficient β de l'équation (3).

4. Lorsque Einstein, en 1905, conçut la théorie de la relativité restreinte l'expression qu'il attribua au coefficient β, pour établir l'accord entre les principes I et II, était hypothétique; elle est directement vérifiable maintenant, grâce aux expériences faites avec des projectiles d'une très grande vitesse (rayons cathodiques).

Considérons, pour nous en rendre compte, une particule matérielle se déplaçant avec la vitesse v dans la direction positive de l'axe des x d'un certain système galiléen S. Perpendiculairement au trajet de la particule, dans le sens positif de l'axe des y, on produit, pendant une durée infinitésimale, une impulsion modifiant la quantité de mouvement $m\mathbf{v}$ de la particule dont m désigne la masse. Le vecteur de l'impulsion $d(m\mathbf{v})$ est orienté parallèlement à l'axe des y.

Introduisons maintenant un second système de référence galiléen S′ orienté parallèlement au premier, mais tel que la vitesse relative de la particule par rapport à ce système soit primitivement nulle. Soit m_0 la masse de la particule mesurée avec les instruments du second système. On y observera un changement de vitesse dv'_y, représenté par un vecteur infiniment petit parallèle à l'axe des y, soit un changement de la quantité de mouvement $m_0 dv'_y$.

Imaginons encore une seconde particule exactement pareille à la première, mais en repos par rapport au système S, et présentant, par conséquent, dans ce système une masse m_0. Si la première particule, en passant, cède à cette seconde particule tout l'excédent $d(m\mathbf{v})$ de la quantité de mouvement qu'elle a reçu par suite de l'impulsion, la seconde particule prendra une vitesse dv'_y soit une quantité de mouvement $m_0 dv'_y$, car par rapport au système S la seconde particule se comporte exactement de la même façon que la première par rapport à S′.

Or, l'impulsion reçue étant $d(m\mathbf{v})$ il résulte du principe de l'égalité de l'action et de la réaction que:

$$m_0 dv'_y = d(m\mathbf{v}) \, .$$

D'autre part, l'impulsion en question est, par hypothèse, infiniment petite et perpendiculaire à la direction du mouvement de la particule. Le changement que subit la vitesse v est donc infiniment petit de second ordre. Si le facteur m, la « masse » de la particule en mouvement, ne dépend que de la grandeur de la vitesse et non pas de sa direction on doit avoir:

$$d(m\mathbf{v}) = m dv_y \, ,$$

où dv_y est la composante de vitesse imprimée à la particule en mouvement par l'impulsion, telle qu'elle résulte des mesures rapportées au système S.

On a donc:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{dv'_y}{dv_y} .$$

Puisqu'enfin, d'après la seconde des équations (2), les mesures de longueur faites suivant la direction de l'axe des y fournissent le même résultat dans les deux systèmes de référence, il vient

$$\frac{m}{m_0} = \frac{dt}{dt'} . \tag{4}$$

La loi selon laquelle le rapport $\frac{m}{m_0}$ varie avec la vitesse v du mobile a été déterminée avec une très grande précision par MM. C.-E. Guye et C. Lavanchy [1] qui ont étudié la déviation, dans des champs de force, des rayons cathodiques de grande vitesse (jusqu'à 150 000 km/sec). Cette loi, exprimant en fonction de la vitesse la « masse transversale » du mobile, est:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} . \tag{5}$$

Elle a été utilisée aussi par M. A. Sommerfeld [2] pour introduire la « correction de relativité » dans la dynamique du modèle d'atome de Bohr, ce qui a permis de prévoir quantitativement la structure fine des raies spectrales de l'hydrogène et de l'hélium. Ces vérifications s'étendent à un très grand intervalle de vitesses; la formule (5) est donc actuellement une des mieux contrôlées de la physique expérimentale entière.

En dérivant par rapport à t l'équation (3) et en posant $\frac{dx}{dt} = v$ nous obtenons:

$$\frac{dt'}{dt} = \beta \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) ,$$

[1] C. E. Guye et C. Lavanchy. *Arch. des Sc. phys. et nat.*, *42* (1916). Voir aussi: C. E. Guye. *Mém. de la Soc. de phys. de Genève.* Vol. 39, fasc. 6 (1921).

[2] A. Sommerfeld. *Ann. der Phys.*, *51* (1916), et, Atombau und Spektrallinien, Chap. 5.

puis, d'après (4) et (5)

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot$$

La quatrième équation de transformation est donc:

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (6)$$

5. Il résulte des considérations précédentes que les équations de transformation de Lorentz, et par conséquent le principe de constance de la vitesse de la lumière, appartiennent actuellement aux lois empiriques les mieux vérifiées. Ce fait constitue un des arguments les plus puissants en faveur des équations de Maxwell qui, à cause de leur covariance vis-à-vis de la transformation de Lorentz, jouent un rôle particulièrement timportant dans la physique théorique actuelle. Tout l'électromagnétisme repose ainsi sur la théorie de la relativité restreinte, mais cette théorie elle-même est une théorie cinématique qui, tout en se présentant primitivement sous les aspects d'une théorie électrodynamique, ne s'est montrée vraiment féconde que dans le domaine de la mécanique. Il est vrai que l'optique et l'électromagnétisme seuls ont fourni une technique expérimentale suffisamment perfectionnée pour permettre le contrôle de la théorie.

Peut-être ces remarques pourront-elles contribuer à dissiper des préventions contre la théorie d'Einstein. Il n'existe, dans l'état actuel de la physique, pas de théorie qui se trouve dans un contact plus étroit avec l'expérience, et toute tentative de la remplacer, dans le domaine de sa validité, par une autre s'accordant aussi bien avec notre connaissance des phénomènes naturels paraît vouée à un échec certain.