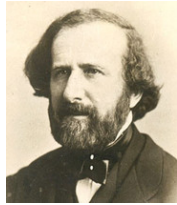
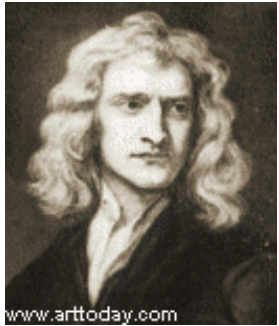
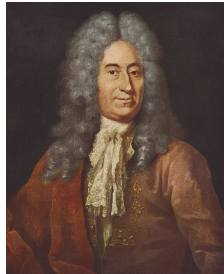
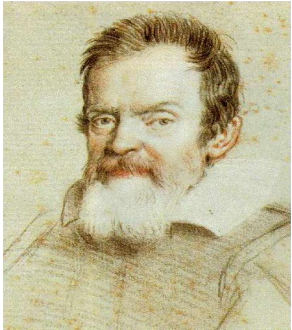


# Genèse de la théorie de la relativité restreinte



## La relativité de Galilée et de Newton

## Galilée et le « principe de relativité » 1632 : *Dialogue sur les deux plus grands systèmes du monde*,



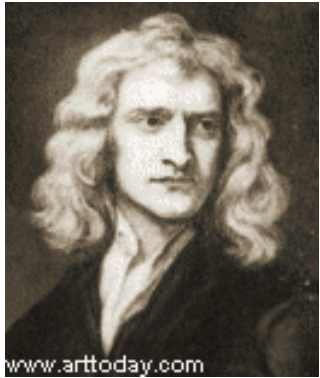
« Enfermez-vous [...] dans la cabine principale à l'intérieur d'un grand bateau et prenez avec vous des mouches, des papillons [...]. [...] suspendez une bouteille qui se vide goutte à goutte dans un grand récipient en dessous d'elle. Avec le bateau à l'arrêt, observez soigneusement comment les petits animaux volent à des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. [...] les gouttes tombent dans le récipient en dessous, [...]

[...] faites avancer le bateau à l'allure qu'il vous plaira, pour autant que la **vitesse soit uniforme** et ne fluctue pas de part et d'autre. Vous ne verrez pas le moindre changement dans aucun des effets mentionnés et même aucun d'eux ne vous permettra de dire si le bateau est en mouvement ou à l'arrêt ... ».

*Lock yourself [...] in the main cabin inside a large boat and take with you flies, butterflies [...]. [...] hang a bottle which empties drop by drop into a large container beneath it. With the boat stationary, observe carefully how the small animals fly at equal speeds to all sides of the cabin [...] the drops fall into the container below, [...] . [...] move the boat forward at any speed you like, as long as the speed is uniform and does not fluctuate from side to side [...]. You will not see the slightest change in any of the effects mentioned, and even none of them will enable you to tell whether the boat is moving or stationary ...*

« le mouvement [uniforme] est comme rien »

*[Uniform] motion is as nothing*



« Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément, et s'appelle *durée* ».

« L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire et immobile »

1<sup>ère</sup> loi : *Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque chose n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état [loi de l'inertie].*

2<sup>ème</sup> loi [[loi fondamentale de la dynamique](#)]

3<sup>ème</sup> loi : *L'action est toujours égale et opposée à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales, et dans des directions [sens] contraires [[loi d'action/réaction](#)].*

*Absolute time, true and mathematical, with no relation to anything external, flows uniformly and is called duration.  
Absolute space, with no relation to external things, always remains similar and immobile.*

*1<sup>st</sup> law: Every body perseveres in the state of rest or uniform motion in a straight line in which it finds itself, unless something acts on it and forces it to change state [law of inertia].*

*2<sup>nd</sup> law [dynamical law]*

*3<sup>rd</sup> law: Action is always equal and opposite to reaction; that is, the actions of two bodies on each other are always equal, and in opposite directions [law of action/reaction].*

**Optics, 1704** : Je nomme Rayons les moindres parties de la lumière, tant celles qui sont successives dans les mêmes lignes, que celles qui sont simultanées dans des lignes différentes.



« La relativité optique »  
(ordre  $V/c$ )

**Keywords** : Observatoire de Paris, académie des sciences, polytechnique, école normale supérieure

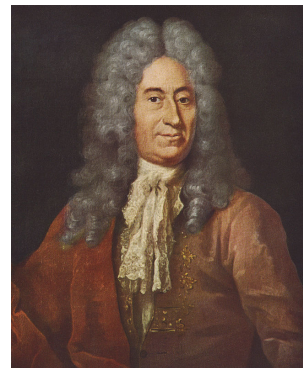
Arago, Fresnel, Fizeau, Mascart, Poincaré

École française de physique mathématique



Quelques éléments à prendre en compte ...

Ole Roemer, 1676



Vitesse de la lumière

à l'Observatoire de Paris ...

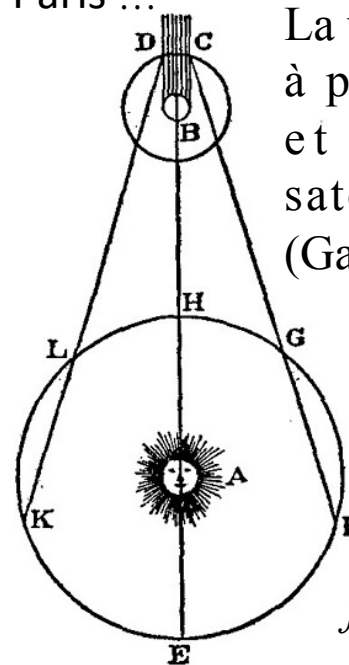


FIG. 70.

La vitesse de la lumière à partir des immersions et émersion des satellites de Jupiter (Galilée, 1610)

*The speed of light from the immersions and emersions of Jupiter's satellites.*

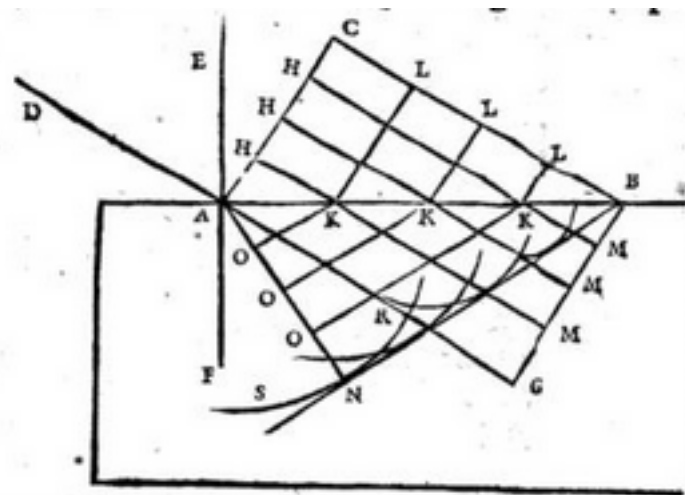
Christian Huygens, 1678 (1690)



Surfaces d'ondes

La lumière se propage de proche en proche, comme un choc, dans un milieu mécanique hypothétique, l'éther.

*Light propagating from near to near, like a shock in a hypothetical mechanical medium, the ether.*

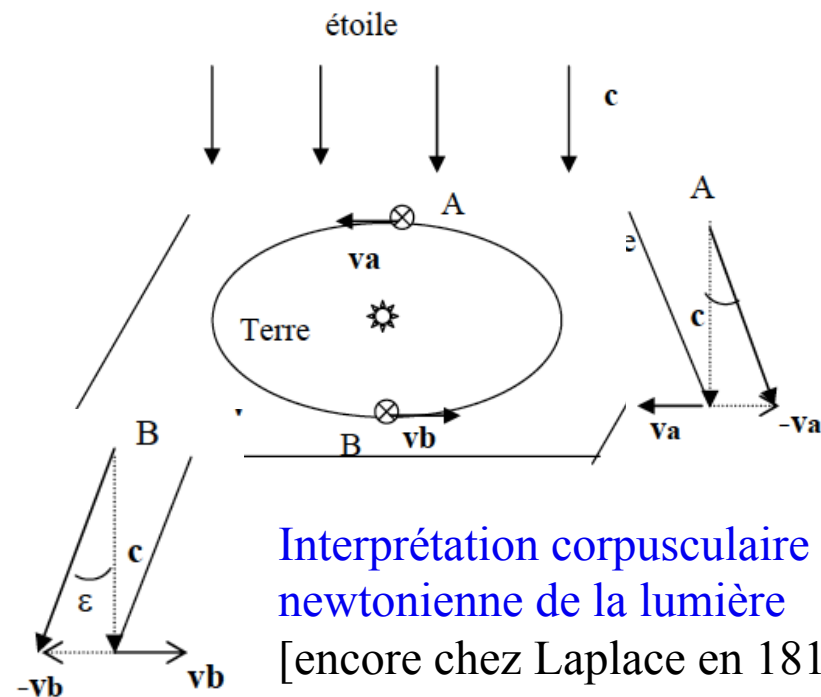


Vitesse de la lumière très grande mais finie, déterminée (approximativement)

James Bradley, 1728



Aberration



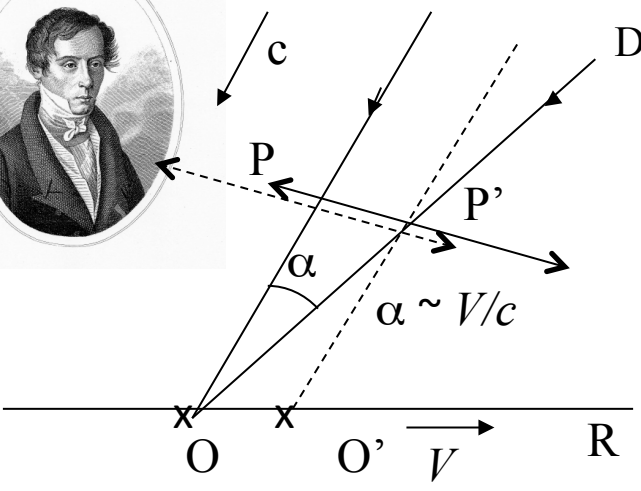
Interprétation corpusculaire newtonienne de la lumière [encore chez Laplace en 1813]



Direction vraie de l'étoile

Fresnel 1814 : interprétation de l'aberration stellaire. Lettre à Léonor Fresnel.

Direction apparente de l'étoile



« Suppose que l'œil de l'observateur soit placé en O à l'extrémité d'une lunette AB dirigée vers une étoile fixe et de manière que son axe OP prolongé passe par le lieu vrai de l'étoile. Maintenant considérons l'effet qui résulte du mouvement progressif de la lumière et du mouvement de l'œil et de la lunette dans le sens OR. [...] alors, en appliquant l'œil en O, tu verras l'étoile par le trou P', parce que l'œil arrivera en O' aussitôt que la lumière qui passera par P' : et voilà pourquoi tu crois que l'étoile est dans le prolongement de la ligne OP', tandis qu'elle est effectivement dans la ligne OP [...]

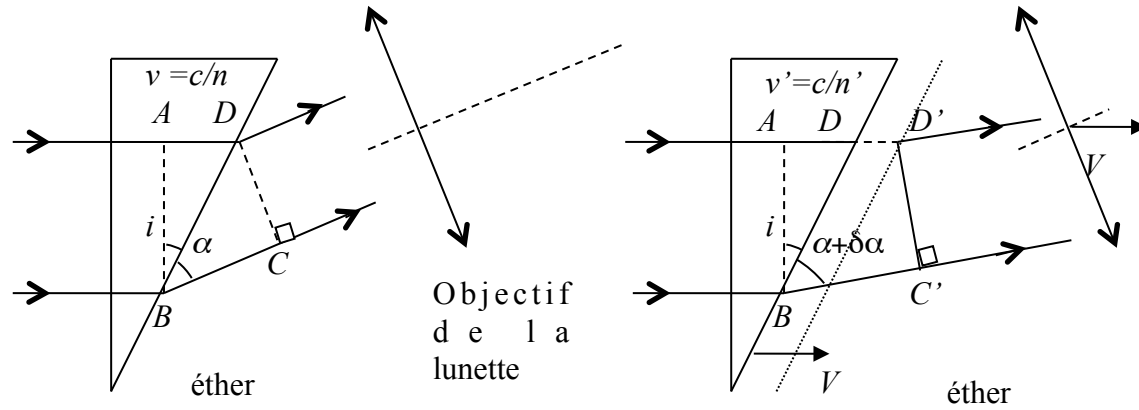
L'hypothèse des vibrations s'accorde alors tout aussi bien que celle de Newton avec le phénomène de l'aberration des étoiles fixes, puisqu'il [...] suffit de reconnaître que la lumière met 8 minutes à venir du soleil à nous, et la terre une année à parcourir son orbite [...]

*Suppose the observer's eye is placed at O at the end of a telescope AB directed at a fixed star, so that its extended axis OP passes through the star's true locus. Now consider the effect resulting from the progressive movement of light and the movement of the eye and telescope in the direction OR [...] then, by applying the eye in O, you will see the star through the hole P', because the eye will arrive in O' as soon as the light passing through P' is seen. and this is why you believe that the star is in the prolongation of the line OP', whereas it is actually in the line OP [...]* The hypothesis of vibrations then fits just as well as Newton's with the phenomenon of the aberration of fixed stars, since it [...] suffices to recognize that light takes 8 minutes to come from the sun to us, and the earth one year to cover its orbit [...].



# La formule d'entraînement de Fresnel (1818)

Lettre à Arago, septembre 1818.



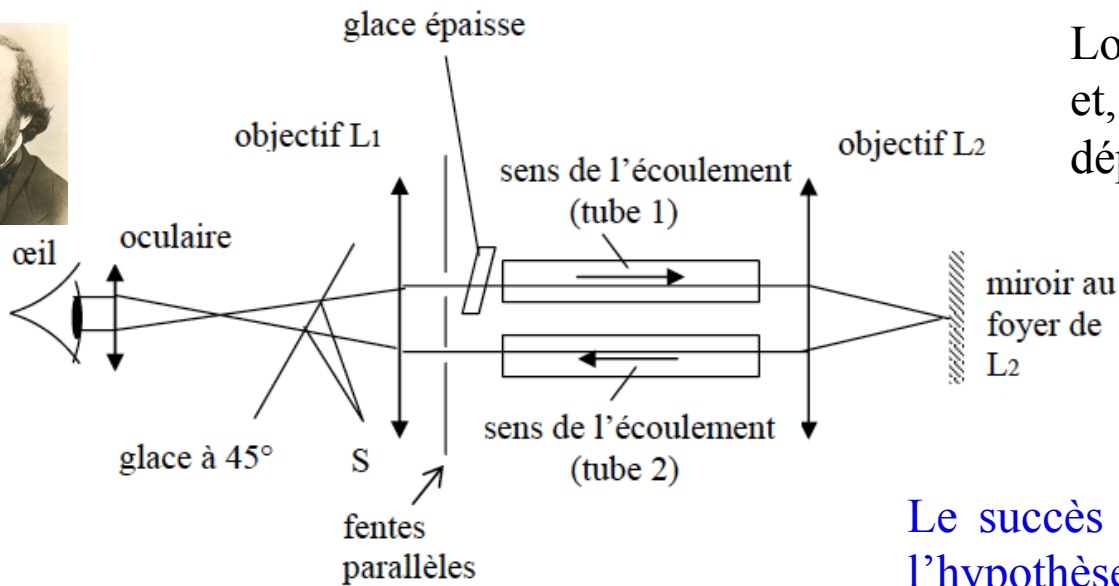
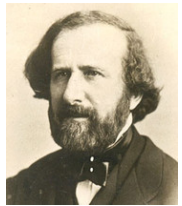
$$v' = c/n + V(1 - 1/n^2)$$

Mais il y a l'aberration ... compensation d'effets ;  
 formule obtenue mathématiquement.  
 (Justification per l'entraînement partiel de l'éther)

Fresnel : « Le mouvement de notre globe ne doit avoir aucune influence sensible sur la réfraction apparente ».

*"The motion of our globe should have no appreciable influence on apparent refraction".*

## Fizeau 1851



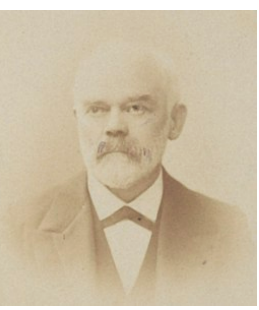
Lorsque l'eau est mise en mouvement, les franges sont déplacées, et, suivant que l'eau se meut dans un sens ou dans l'autre, le déplacement a lieu vers la droite ou vers la gauche.

*When the water is set in motion, the interference fringes are displaced, and depending on whether the water is moving in one direction or the other, the displacement takes place to the right or to the left.*

Le succès de cette expérience me semble devoir entraîner l'adoption de l'hypothèse de Fresnel [...]

*It seems to me that the success of this experiment should lead to the adoption of Fresnel's hypothesis [...]*





Éleuthère Mascart [*Annales de l'ens* 1874] : « La conclusion générale de ce Mémoire serait donc [...] que le mouvement de translation de la Terre n'a aucune influence appréciable sur les phénomènes d'optique produits **avec une source terrestre ou avec la lumière solaire**, que ces phénomènes ne nous donnent pas le moyen d'apprécier le mouvement absolu d'un corps et que les mouvements relatifs sont les seuls que nous puissions atteindre » [Et avec la lumière des étoiles?].

*The general conclusion of this Memoir would therefore be [...] that the translational motion of the Earth has no appreciable influence on optical phenomena produced with a terrestrial source or with sunlight, that these phenomena do not give us the means to appreciate the absolute motion of a body, and that relative motions are the only ones we can attain [And with starlight?].*



Poincaré déduit en 1889 (cours Sorbonne) de la formule de Fresnel (« **entraînement partiel des ondes** ») que les **durées de propagation de la lumière** dans le prisme au repos ( $\Delta t$ ) et en mouvement ( $\Delta t'$ ) sont reliées par :

$$\Delta t' = \Delta t + \vec{V} \cdot \Delta \vec{r} / c^2 \quad (\text{invariance du principe de Fermat})$$

*In 1889, Poincaré deduced from Fresnel's formula ("partial wave entrainment") that the propagation times of light in the prism at rest ( $\Delta t$ ) and in motion ( $\Delta t'$ ) are related by :*

**« En un mot les phénomènes optiques [réflexion, réfraction, interférences, ...] ne peuvent mettre en évidence que des mouvements relatifs par rapport à l'observateur de la source lumineuse et de la matière pondérable ».**

*In a word, optical phenomena can only reveal motions of the light source and the weightable matter relative to the observer.*

Poincaré 1901 dans *Électricité et optique* (Cours 1898-99).

**« Théorème » : « Le mouvement de la Terre n'affecte pas les phénomènes optiques si les termes en carré de l'aberration [ $V^2/c^2$ ] sont négligés »** [entrevoit aussi sa généralisation à tout ordre].

« La relativité au premier ordre en  $V/c$  »  
relativité galiléenne modifiée

Lorentz, Poincaré



Après Maxwell, la problématique des diélectriques en mouvement devient celle de l'électrodynamique des corps en mouvement ...

**Hendrik Anton Lorentz 1892.** « La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants (160 p. en français) » : particules matérielles portant des charges électriques libres de se déplacer dans l'éther immobile (les électrons). Objectif : obtenir la formule de Fresnel à partir des équations de Maxwell dans l'éther, une description microscopique des diélectriques et la « force de Lorentz »  $\vec{f} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ .

*Maxwell's electromagnetic theory and its application to moving bodies (160 p. in French), of material particles carrying electric charges free to move in the immobile ether (electrons). Lorentz obtains the Fresnel formula from Maxwell's equations in the ether, a microscopic description of dielectrics and the Lorentz force.*

**Poincaré 1895 : Éclairage électrique :** ~~Helmholtz 1893, Hertz 1892~~, Lorentz 1892 [« la moins défectueuse de toutes »].

Complément à *Électricité et Optique* (vol. 1 et 2), 1<sup>ère</sup> éd. (1890-91) : Maxwell, Helmholtz, Hertz, ...

« toute théorie électrodynamique des corps en mouvement » doit, aux yeux de Poincaré :

- rendre compte [...] des expériences de M. Fizeau c-à-d de l'entraînement *partiel* des ondes lumineuses [PMR]
- être compatible avec le principe de l'égalité de l'action et de la réaction ».

**L'objection de Poincaré à la théorie de Lorentz : « Malheureusement il reste une difficulté grave : il n'y a plus égalité entre l'action et la réaction [newtonien].**

*Unfortunately, a serious difficulty remains: there is no longer equality between action and reaction*

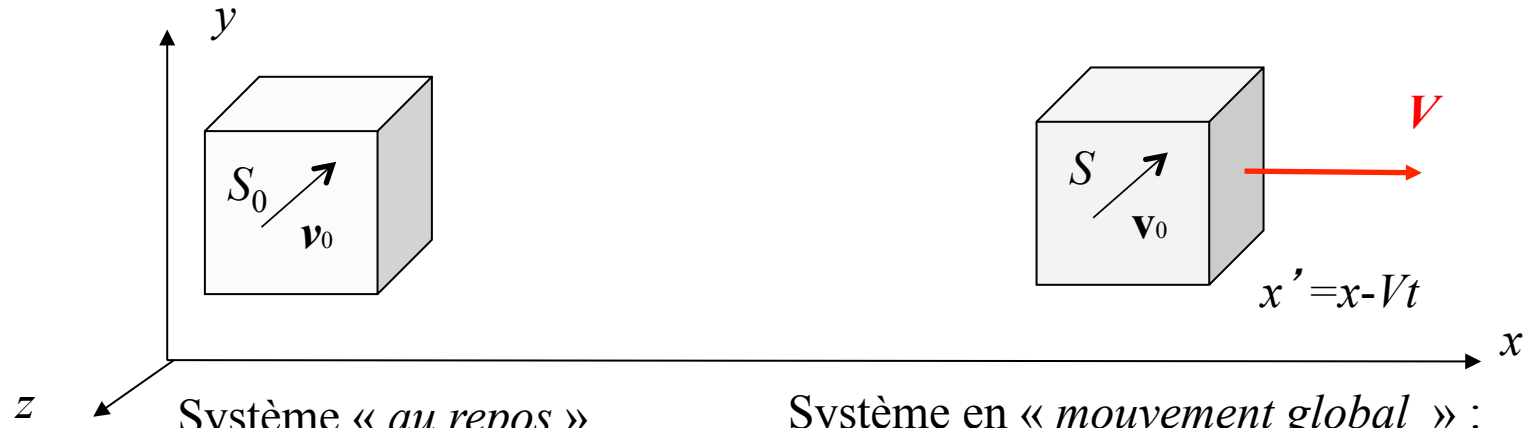
**Poincaré souligne la connexité des principes de mouvement relatif et de réaction**

*Poincaré underlines the connection between the principles of relative motion and reaction*

Remarque. Langevin 1904 : « L'égalité de l'action et de la réaction n'a, d'ailleurs, jamais été démontrée expérimentalement dans des cas semblables [l'électrodynamique], et il n'y a ici aucune difficulté si l'on ne tient pas à étendre ce principe au delà des faits qui l'ont suggéré [la mécanique newtonienne] ». Un monde sépare Poincaré et Langevin, Lorentz, ...



# H. A. Lorentz 1895 (*Versuch*) : diélectriques en mouvement et « *théorie des états correspondants* »



Système « *au repos* »  
dans l'éther :  $v, \rho, E, B \dots$

Système en « *mouvement global* » :  
 $\vec{v}' = \vec{v} + \vec{V}, \rho' = \rho$  (boost galiléen);  $\vec{E}, \vec{B}$  ?

Lorentz cherche un changement de variables  $x', y', z', t', E', B'$  afin de résoudre les équations de Maxwell pour le système  $S$  en faisant en sorte que dans les nouvelles variables, elles ressemblent si possible à celles pour  $S_0$ , ce qui expliquerait l'impossibilité de détecter le mouvement « absolu » de la Terre par rapport à l'éther par des expériences optiques, et plus généralement électromagnétiques, au premier ordre en  $V/c$  (12 expériences). Il trouve :

*Lorentz seeks a change in the variables  $x', y', z', t', E', B'$  in order to solve Maxwell's equations for the system  $S$  in such a way that in the new variables, they resemble if possible those for  $S_0$ , which would explain the impossibility of detecting the "absolute" motion of the Earth relative to the ether by optical, and more generally electromagnetic experiments to first order in  $V/c$  (12 experiments). He finds :*

$$x' = x - Vt \quad t' \text{ temps local} \quad \left( \longrightarrow \text{formule de Fresnel par invariance de la phase lumineuse} \right) \quad \vec{E}' = \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}$$

$$t' = t - \frac{Vx}{c^2} \quad t' \text{ local time} \quad \text{Fresnel's formula by invariance of light phase} \quad \vec{B}' = \vec{B} - \frac{\vec{V} \wedge \vec{E}}{c^2}$$

Lorentz écrit (1915) : « [...] **simples grandeurs auxiliaires** dont l'introduction n'est **qu'un artifice mathématique** [...] la variable  $t'$  ne pouvait être appelée le temps dans le même sens que la variable  $t$  » (**variable fictive pour Lorentz**).

*"[...] simple auxiliary quantities whose introduction is no more than a mathematical artifice [...] the variable  $t'$  could not be called time in the same sense as the variable  $t$ " (fictitious variable for Lorentz).*

Invitation de H. Kammerlingh Onnes pour le *Jubilé* pour Lorentz en septembre 1900.

« Rappelons d'abord rapidement le calcul par lequel on établit que dans la théorie de Lorentz le principe de l'égalité de l'action et de la réaction [PRN] n'est plus vrai, du moins quand on veut l'appliquer à la matière seule ». Poincaré part de l'expression de la

$$\vec{F} = \int (\rho \vec{E} + \vec{j} \wedge \vec{B}) d\tau$$

*First, let us quickly recall the calculation by which we establish that in Lorentz's theory the principle of equality of action and reaction is no longer true, at least when we want to apply it to matter alone. Poincaré starts from Lorentz's expression of force.*

Utilisant les éqs. de Maxwell, etc., Poincaré obtient l'expression de la force subie par les charges à l'intérieur du volume :

$$\text{Using Maxwell's eqs. etc., Poincaré obtains the force experienced by charges inside the volume : } \vec{F} = -\frac{d}{dt} \int \varepsilon_0 (\vec{E} \wedge \vec{B}) d\tau$$

Par analogie avec  $\vec{F} = d\vec{p}/dt$ , il introduit  $\vec{p}_{em} = \varepsilon_0 (\vec{E} \wedge \vec{B})$  dans le bilan de qdm  $M\vec{v} + \varepsilon_0 (\vec{E} \wedge \vec{B}) = \vec{C}$ , et l'identifie « au vecteur radial de Poynting » [à  $c^2$  près] traduisant la propagation de l'énergie électromagnétique : « quantité de mouvement de l'énergie électromagnétique ».

*He identifies this term with "the radial Poynting vector" [up to  $c^2$ ], i.e. the propagation of electromagnetic energy and calls it "momentum of electromagnetic energy".*

$$\text{Théorème du CDM} \quad \frac{d}{dt} M\vec{R} = \vec{C} - \int \vec{r} (\vec{j} \cdot \vec{E}) / c^2 d\tau \quad \text{Poincaré : analogie du fluide fictif. Einstein, se basant sur cette équation en 1906, inertie de l'énergie.}$$

Wien 1915 : « Un article qu'il publie en 1900 dans le Jubilé de Lorentz est d'une grande importance pour la physique théorique. Il y a introduit la quantité de mouvement électromagnétique, qui a permis d'éliminer la contradiction vis-à-vis du principe de l'action et de la réaction, une théorie devenue très importante pour le développement ultérieur de l'électrodynamique ».

*An article he published in 1900 in Lorentz's Jubilee is of great importance for theoretical physics. In it, he introduced electromagnetic momentum, which eliminated the contradiction with the principle of action and reaction, a theory that has become very important for the further development of electrodynamics.*



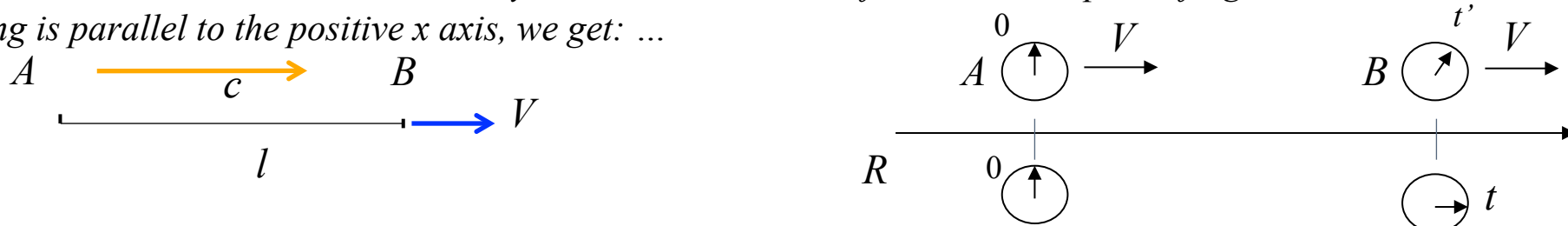
Poincaré isole 4 raisons qui permettent à la théorie de Lorentz de 1895 de satisfaire le PMR :

1. [en] négligeant  $v^2$  [...].

2. Pour que la compensation se fasse, il faut rapporter les phénomènes, non pas au temps vrai  $t$ , mais à un certain temps local  $t'$  défini de la façon suivante. Je suppose que des observateurs placés en différents points, règlent leurs montres à l'aide de signaux lumineux ; qu'ils cherchent à corriger ces signaux du temps de la transmission, mais qu'ignorant le mouvement de translation dont ils sont animés et croyant par conséquent que les signaux se transmettent également vite dans les deux sens, ils se bornent à croiser les observations, en envoyant un signal de  $A$  en  $B$ , puis un autre de  $B$  en  $A$ . Le temps local  $t'$  est le temps marqué par les montres ainsi réglées. Si alors  $c$  est la vitesse de la lumière [invariante au premier ordre], et  $V$  la translation de la Terre que je suppose parallèle à l'axe des  $x$  positifs, on aura :  $t' = t - Vx/c^2$

*For compensation to take place, phenomena must be related, not to true time  $t$ , but to a certain local time  $t'$  defined as follows.*

*I suppose that observers placed at different points set their watches by means of luminous signals; that they seek to correct these signals for the time of transmission, but that, unaware of the translational movement of which they are animated and believing consequently that the signals are transmitted equally quickly in both directions, they confine themselves to crossing observations, sending a signal from  $A$  to  $B$ , then another from  $B$  to  $A$ . The local time  $t'$  is the time marked by the watches thus set. If then  $c$  is the speed of light, and  $V$  the translation of the Earth, which I'm assuming is parallel to the positive  $x$  axis, we get: ...*



(réception du signal par  $B$  à  $t' = l/c$ , en  $x = ct = l + Vt = l + Vx/c$  dans l'éther. En éliminant  $l$  on obtient le temps local  $t'$ ).

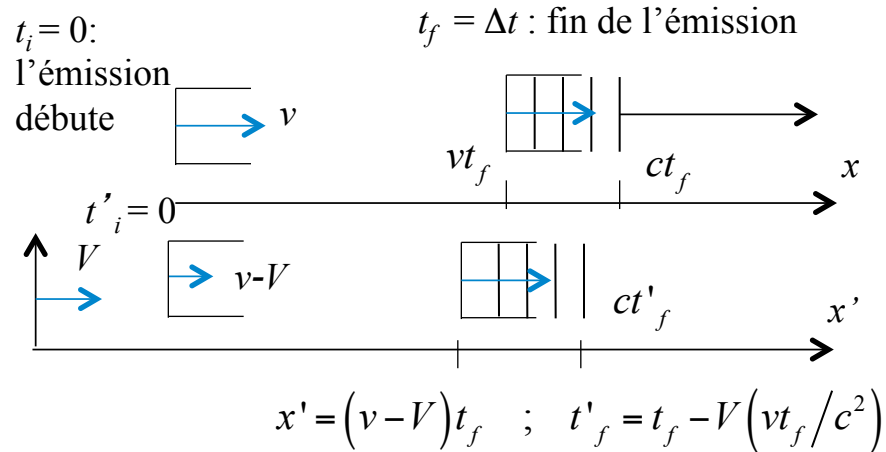
3. ... l'énergie apparente n'est pas exactement égale à l'énergie réelle correspondante ...

4. ... force apparente complémentaire qui n'existe pas dans le mouvement absolu [force de Liénard:  $\vec{f}' = \vec{f} - \left( \vec{j} \cdot \vec{E} \right) \vec{V} / c^2$ ]

« Ainsi dans la théorie de Lorentz le principe de réaction [newtonien] ne doit pas s'appliquer à la matière seule ; le principe de mouvement relatif ne doit pas non plus s'appliquer à la matière seule. Ce qu'il importe de remarquer c'est qu'il y a entre les deux faits une connexion intime et nécessaire »

*Thus, in Lorentz's theory, the principle of reaction must not apply to matter alone ; nor must the principle of relative motion apply to matter alone. What is important to note is that there is an intimate and necessary connection between the two facts.*

Poincaré applique les changements de variables de Lorentz  $x' = x - Vt, t' = t - Vx/c^2$ ,  $\vec{E}' = \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}$ ,  $\vec{B}' = \vec{B} - \vec{V} \wedge \vec{E} / c^2$  à un **oscillateur hertzien** qui émet un **train d'onde plan** dans une direction donnée.



$L$  Longueur *réelle* du train d'onde,  $L'$  longueur *apparente*

$$\begin{aligned} \text{Énergie } \textit{réelle} J\Delta t & & L' = L(1 + V/c) & & \text{(énergie comme fréquence!)} \\ \text{Énergie } \textit{apparente} J'\Delta t & & J' = J(1 - V/c) & & \end{aligned}$$

Quantité de mouvement électromagnétique au premier ordre :

$$p' = J'\Delta t/c = p - VJ\Delta t/c \left[ = p - VE/c \right]$$

**Recul du « canon »**  
(masse  $m$  constante)

*réel*:  $\Delta(mv) = m\Delta v = -J\Delta t/c$

*apparent*:  $\Delta(mv') = \Delta(m(v - V)) = \Delta mv = -J'\Delta t/c = -J\Delta t/c + \boxed{\left( \frac{JV}{c^2} \right) \Delta t}$

force de Liénard

« Si donc, dans la théorie de Lorentz, le recul peut avoir lieu sans violer le principe de l'énergie, c'est que l'énergie apparente pour un observateur entraîné avec les axes mobiles n'est pas égale à l'énergie réelle. Supposons donc que notre excitateur subisse un mouvement de recul et que l'observateur soit entraîné dans ce mouvement ( $v' = v < 0$ ), l'excitateur paraîtra immobile à cet observateur et il lui semblera qu'il rayonne autant d'énergie qu'au repos. Mais en réalité il en rayonnera moins et c'est ce qui compense le travail de recul »

« L'existence de la force complémentaire apparente est donc une conséquence nécessaire du phénomène de recul »

## La relativité (à tout ordre)

Lorentz 1904, Poincaré 1905, Einstein 1905

H. A. Lorentz 1904, Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light.

Nouveau  
changement  
de variables  
(à tout  
ordre) :

$$\begin{aligned} x' &= \gamma l(x) \\ t' &= \frac{l}{\gamma} t - \gamma l \frac{v}{c^2} (x) \\ (x) &= (x - vt) \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \end{aligned}$$

« Lorentz a cherché à compléter et à modifier son hypothèse de façon à la mettre en concordance avec le postulat de l'impossibilité complète de la détermination du mouvement absolu », Poincaré CRAS, 1905. Mais seulement **invariance de 3/4 équations de Maxwell**.

*Lorentz sought to complete and modify his hypothesis so as to bring it into line with the postulate of the complete impossibility of determining absolute motion, Poincaré CRAS, 1905 But only invariance of 3/4 of Maxwell's equations.*

Électron de Lorentz   $\vec{p} = m\vec{v} / \sqrt{(1 - v^2 / c^2)}$

H. Poincaré, Sur la dynamique de l'électron, *Comptes rendus des séances de l'académie des sciences (CRAS)*, 5 juin 1905

Poincaré a vu que le **boost galiléen initial** de Lorentz ( $\vec{v}' = \vec{v} + \vec{V}$ ,  $\rho' = \rho$ ) ne peut pas être compensé par le changement de variables. Il faut le remplacer par un « **boost Lorentzien** » : utiliser une (nouvelle) cinématique compatible avec ces transformations.

« Il semble que cette impossibilité de démontrer le mouvement absolu soit une loi générale de la nature ». "It seems that this impossibility to demonstrate absolute motion is a general law of nature".

L'hypothèse de Langevin aurait l'avantage de se suffire à elle-même [...]. **Mais je montre**, d'accord en cela avec Lorentz, qu'elle **est incapable de s'accorder avec l'impossibilité d'une expérience montrant le mouvement absolu** [condition de groupe].

$$\begin{aligned} x' &= l\gamma(x + \varepsilon t) \\ t' &= l\gamma(t + \varepsilon x) \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \end{aligned}$$

$c=1$   
 $\varepsilon$  vitesse  
 $l$  = **facteur de dilatation**  
**(sous-)groupe** si  $l(\varepsilon) = 1$

« *Transformations de Lorentz* » (actives)

Langevin's hypothesis would have the advantage of being self-sufficient [...]. But I show, in agreement with Lorentz, that it is incapable of being reconciled with the impossibility of an experiment showing absolute motion [group condition].

« Il semble que cette impossibilité de mettre en évidence expérimentalement le mouvement absolu de la Terre soit une loi générale de la Nature ; nous sommes naturellement portés à admettre cette loi, que nous appellerons **Postulat de Relativité [PR]** et à l'admettre **sans restriction** ».

Poincaré fonde de nouveau son approche de la dynamique de l'électron sur la **compatibilité de principes** : Principe de moindre action [PMA] et **Postulat de relativité [PR]** :

*Poincaré once again based his approach to electron dynamics on the compatibility of the following principles : Principle of Least Action and Postulate of Relativity.*

- Action électromagnétique décrivant un modèle d'électron étendu (§2)
- « Voyons si le principe de moindre action nous donne la raison du succès des transformations de Lorentz » (§3)

$$S = \int L \cdot dt = S' = \int L' \cdot dt', \quad L = l L' / \gamma, \quad l = 1 \quad \rightarrow \quad L = L' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

(**Invariance de l'action** par le **groupe de transformation de Lorentz** : PMA et PR, §3 et 6)

- Les équations de Hamilton (conséquence du PMA en mécanique) reliant énergie, quantité de mouvement et lagrangien ne sont vérifiées qu'avec l'hypothèse de Langevin d'un électron conservant son volume  $l = \gamma^{-1/3}$  ; nouveau conflit de la théorie de Lorentz avec la mécanique.

*Hamilton's equations (consequence of PMA in mechanics) linking energy, momentum and Lagrangian are only verified with Langevin's hypothesis of an electron conserving its volume; new conflict between Lorentz's theory and mechanics.*

- Introduction d'un terme de pression (non électromagnétique) dans le lagrangien [**modification du modèle d'électron de Lorentz**] pour assurer la **compatibilité entre PMA et PMR** (stabilité de l'électron relativiste)



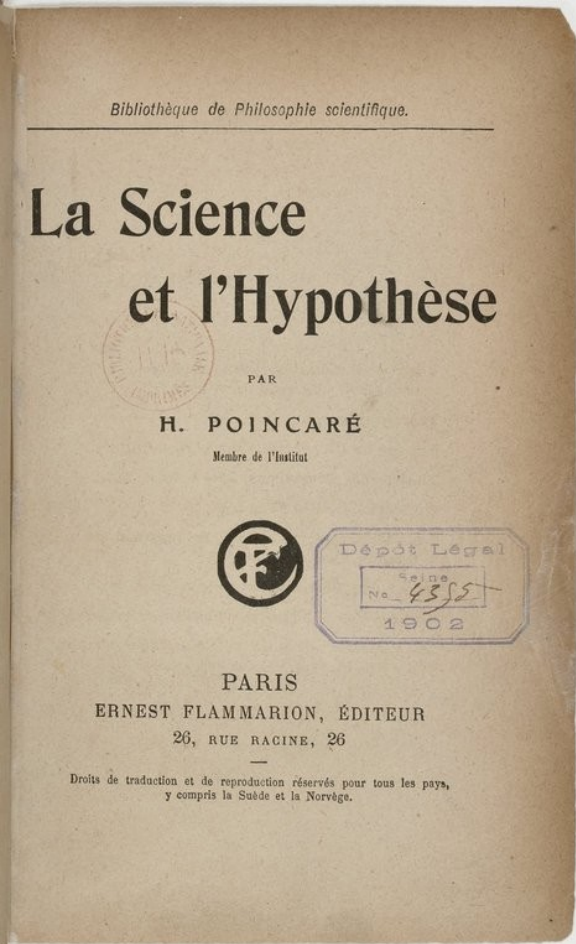


« Des exemples similaires [induction], tout comme l'essai infructueux de détecter le mouvement de la Terre relativement au "medium de la lumière", nous amène à la supposition que non seulement en mécanique, mais aussi en électrodynamique, aucune propriété des faits observés ne correspond au concept de repos absolu ; et que dans tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont vraies, les équations électrodynamiques et optiques équivalentes sont également vraies, comme il a déjà été montré par l'approximation au premier ordre des grandeurs [en  $V/c$  : Lorentz + Poincaré]. Dans le texte qui suit, nous élevons cette conjecture au rang de **postulat** (que nous appellerons désormais « **principe de relativité** »)

et introduisons un autre postulat – qui au premier regard est incompatible avec le premier – que **la lumière se propage dans l'espace vide, à une vitesse  $c$  indépendante de l'état de mouvement du corps émetteur**. Ces deux postulats suffisent entièrement pour former une théorie simple et cohérente de l'électrodynamique des corps en mouvement à partir de la théorie maxwellienne des corps au repos. Il sera démontré que l'introduction d'un « **éther luminifère** » est superflue [...] ».

*Électrodynamique des corps en mouvement*, juin 1905

*Examples of a similar kind, and the failure of attempts to detect a motion of the earth relative to the "light medium", lead to the conjecture that not only in mechanics, but in electrodynamics as well, the phenomena do not have any properties corresponding to the concept of absolute rest, but that in all coordinate systems in which the mechanical equations are valid, also the same electrodynamic and optical laws are valid, as has already been shown for quantities of the first order [in  $V/c$ ]. We shall raise this conjecture [4] (whose content will be called "the principle of relativity" hereafter) to the status of a postulate and shall introduce, in addition, the postulate, only seemingly incompatible with the former one, that in empty space light is always propagated with a definite velocity  $V$  which is independent of the [5] state of motion of the emitting body. These two postulates suffice for arriving at a simple and consistent electrodynamics of moving bodies on the basis of Maxwell's theory for bodies at rest. The introduction of a "light ether" will prove superfluous [...].*



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Maurice Solovine, 1956 :

« [...] *La Science et l'hypothèse* de Poincaré, un livre qui nous a profondément impressionné et tenu en haleine pendant longues semaines ».

Albert Einstein à Michele Besso, 1952 : « À Berne, j'avais régulièrement des soirées de lecture philosophique et de discussion avec C. Habicht et Solovine, au cours desquelles nous nous occupions surtout de Hume (dans une très bonne édition allemande). Cette lecture a eu une certaine influence sur mon développement à côté de Poincaré et de Mach. C'est toi qui m'as recommandé ce dernier lors de mes années d'étude, après que nous eûmes fait connaissance chez Madame Caprotti ».

*La Science et l'hypothèse*, H. Poincaré.

1° Il n'y a pas d'espace absolu et nous ne concevons que des mouvements relatifs ; cependant on énonce le plus souvent les faits mécaniques comme s'il y avait un espace absolu auquel on pourrait les rapporter ;

2° Il n'y a pas de temps absolu ; dire que deux durées sont égales, c'est une assertion qui n'a par elle-même aucun sens et qui n'en peut acquérir un que par convention ;

3° Non seulement nous n'avons pas l'intuition directe de l'égalité de deux durées, mais nous n'avons même pas celle de la simultanéité de deux événements qui se produisent sur des théâtres différents ; c'est ce que j'ai expliqué dans un article intitulé *la Mesure du temps* [1898]

Cela renvoie un lecteur averti à Poincaré 1900!  $\Delta t' = \Delta t - V \Delta x / c^2$

*Beiblätter zu den Annalen der Physik* (R. Gans, février 1905). Donne la nouvelle formule du temps local de Lorentz ... étape que l'on retrouve dans la démonstration des transformations de Lorentz par Einstein en 1905.

Einstein, rétrospectivement en 1907 : “One had only to realize that an auxiliary quantity introduced by H. A. Lorentz and named by him ‘local time’ could be defined as ‘time’ in general”.

## Liens entre quanta et relativité restreinte chez Einstein

La question de la **vitesse** des quanta n'était **pas abordée** dans **l'article de mars 1905**... Le **second postulat** leur donne une **propriété d'onde électromagnétique** (pour laquelle la vitesse ne dépend que des caractéristiques du milieu).

Note dans l'article de septembre 1905 : « The principle of the constancy of the velocity of light is of course contained in Maxwell's equations ». Son origine en était donc indépendante l'esprit d'Einstein en juin.

Quand Einstein **doute des quanta**, il écrit : Les quanta remplissent certes leur fonction de quanta, mais ils n'ont pas d'existence, pas plus que l'éther au repos. Celui-ci se retourne consciencieusement dans sa tombe, en ce moment, avec l'espoir de retrouver une Nouvelle vie – le pauvre. Lettre à L. Hopf, décembre 1911.

Dans **l'article de juin**, Einstein montre implicitement que **les quanta sont relativistes (transformation de l'énergie et de leur fréquence)** : « un des grands euphémismes de l'histoire des sciences » (Miller).

R. Penrose ...



S C I E N C E S & H I S T O R Y

*Preface by  
Tilman SAUER*

**CHRISTIAN BRACCO**

# WHEN ALBERT BECAME EINSTEIN

**1895-1901**

edp sciences

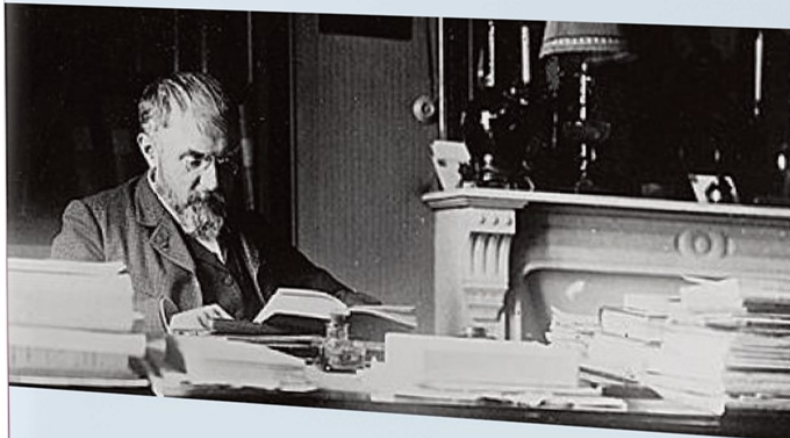


COLLECTION HISTOIRE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

## Henri Poincaré et la relativité : 1900, 1905, 1912

*trois moments de sa réflexion*

Christian Bracco  
Jean-Pierre Provost



ISTE  
editions



Savant universaliste comme Gauss, dont il est considéré comme l'égal pour les mathématiques, Henri Poincaré (1854-1912) a promu l'importance de l'idée de relativité en physique dès 1889 à propos de l'optique de Fresnel. Il y associe en 1900 le « temps local » de Lorentz, puis en 1905 les notions modernes de « groupe de symétrie » et d'« invariant » qu'il applique à l'électromagnétisme, la dynamique et la gravitation.

Cet ouvrage introduit et commente en détail l'article méconnu de 1900 de Poincaré en hommage à Lorentz, puis sa communication de 1905 à l'Académie des sciences et ses dernières réflexions en 1912 sur la signification physique du principe de relativité. Il offre pour la première fois au lecteur un résumé complet et fidèle du difficile *Mémoire de Palerme* de 1905 où sont développés les aspects mathématiques. Une introduction générale permet de mieux saisir la personnalité singulière de Poincaré et la place qu'occupe aujourd'hui la relativité en physique.

Ouvrage papier **77.00 €**

ISBN : 9781784059507 (papier)

*Diplômé de l'ENS Cachan et agrégé de physique, Christian Bracco est maître de conférences HDR en histoire des sciences.*

*Diplômé de l'ENS Ulm et agrégé de physique, ancien professeur des universités, Jean-Pierre Provost est physicien théoricien.*

Le format ebook est à **9.90€**

(Offre uniquement pour les particuliers disponible sur [istegroup.com](http://istegroup.com))

Le prix indiqué de nos ouvrages ne comporte pas de TVA

[www.istegroup.com](http://www.istegroup.com)